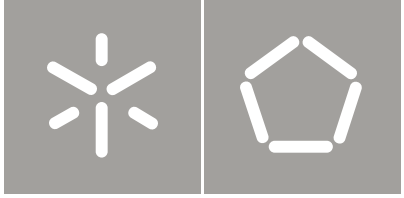
Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Pedro Miguel Carvalho da Conceição

Sinalização Rodoviária com LEDs de Alto Brilho Alimentada por Sistema Fotovoltaico

Setembro de 2011

Sinalização Rodoviária com LEDs de Alto Brilho Alimentada por Sistema Fotovoltaico
Pedro Miguel Carvalho da Conceição
UMinho | 2011



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Pedro Miguel Carvalho da Conceição

Sinalização Rodoviária com LEDs de Alto Brilho Alimentada por Sistema Fotovoltaico

Dissertação de Mestrado
Ciclo de Estudos Integrados Conducentes ao
Grau de Mestre em Engenharia Electrónica Industrial e Computadores

Trabalho efectuado sob a orientação do
Professor Doutor Manuel João Sepúlveda Mesquita de Freitas

Setembro de 2011

Aos meus Pais

Agradecimentos

Para a concretização de um projecto em que colocamos tanto de nós, é impossível que não precisemos de colocar um pouco dos outros. Este é o espaço em que faço uma simples homenagem e agradeço a todos aqueles que me ajudaram nesta longa maratona.

Deixo o meu agradecimento ao professor Doutor Manuel João Sepúlveda Mesquita de Freitas, meu orientador, pela oportunidade que me concedeu para o desenvolvimento deste trabalho, mas principalmente pela orientação e pelos vários conselhos e sugestões preciosas dadas durante a dissertação.

Um agradecimento especial ao professor Doutor José Manuel T. V. Cabral pela cedência temporária do laboratório de investigação, a seu cargo, numa fase inicial da dissertação e também pelos bravos conselhos dados ao longo da mesma.

Aos colegas e amigos do laboratório, Luís Pacheco, Rui Barros, João Brás, Leandro Cruz, Vitor Costa e em especial ao Cláudio Gomes pela amizade, apoio, interesse e companhia prestados durante o trabalho.

Aos técnicos das oficinas do Departamento de Electrónica Industrial, Sra. Ângela, Sr. Carlos e Sr. Joel pela sua disponibilidade, serviços e ajuda.

A todos os meus amigos pelos momentos incríveis que passamos juntos e que fizeram com que eu reaviva-se as minhas forças quando elas pareciam não existir, a todos sem excepção o meu agradecimento pelo apoio e companheirismo, nunca os esquecerei.

À Camila Lobato, companheira de muitas horas, agradeço pelo apoio, incentivo, coragem, felicidade e carinho que sempre me proporcionou.

E acima de tudo, agradeço aos meus pais pelo incansável e incondicional apoio, carinho, dedicação e paciência que tiveram comigo. Agradeço especialmente as oportunidades que me proporcionaram de estudar. Sem eles esta dissertação não existiria.

A todos, Muito Obrigado!

Resumo

A presente dissertação tem como intuito principal criar um sistema de alimentação para um módulo de iluminação rodoviário autónomo tendo como base a energia solar fotovoltaica. Para efectuar o armazenamento de energia, proveniente do painel fotovoltaico, utilizou-se uma bateria de ácido chumbo de 12V. Foi implementado um controlo PID (Proporcional Integral Derivativo) com Modulação por Largura de Impulso PWM (*Pulse-Width Modulation*) que altera o valor do *duty-cycle* a enviar para o MOSFET do conversor CC-CC (Corrente Contínua – Corrente Contínua), topologia *Step-Down,* de modo a controlar todo o processo de carga da bateria.

De forma a melhorar a eficiência energética de todo o sistema foi utilizado um algoritmo para maximizar a potência extraída pelo painel fotovoltaico que procura constantemente o MPP (*Maximum Power Point*) do painel fotovoltaico, independente das condições de temperatura e radiação solar existentes. O sistema MPPT (*Maximum Power Point Tracking*) consiste num conversor CC-CC, do tipo *Step-Down,* controlado por um microcontrolador. O algoritmo utilizado para o rastreamento do MPP foi o método P&O (Perturbação e Observação).

A unidade de controlo tem como base um microcontrolador (PIC18F4431) que é capaz de efectuar o processo da carga da bateria, de executar o algoritmo MPPT e de realizar o controlo de brilho dos LEDs de alto brilho que compõe o sinal rodoviário.

O painel solar foi matematicamente modelado e implementado no MATLAB para o estudo das características I-V (Corrente - Tensão) e P-V (Potência - Tensão) do mesmo. Ao longo da dissertação são apresentados os resultados das simulações do sistema completo, realizadas no Simulink, e os resultados experimentais do protótipo desenvolvido do sistema fotovoltaico autónomo.

Palavras-Chave: Energias Renováveis; Energia Solar; Sistemas Fotovoltaicos Autónomos; Baterias; MPPT; LEDs de alto brilho.

Abstract

The main purpose of the present thesis was to develop a power system, based on photovoltaic solar energy, to supply an autonomous road lighting module. In order to store the solar energy, provided by the photovoltaic panel, it was used a 12V lead-acid battery. A PID (Proportional Integral Derivative) control system was used, along with a PWM (Pulse Width Modulation), to set the duty cycle's value of the MOSFET DC-DC (Direct Current - Direct Current), step-down topology, responsible for controlling the battery's charging process.

In order to improve the entire system's energy efficiency, an algorithm that maximizes the power extracted from the photovoltaic panel was used, by constantly seeking the MPP (Maximum Power Point) of the solar panel, regardless the temperature or the solar radiation available. The MPPT system (Maximum Power Point Tracking) consists in a DC-DC Step-Down converter, controlled by a microcontroller. The tracking of the MPP was based on the P&O (Perturbation and Observation) method.

The control unit of the project is based on a microcontroller (PIC18F4431), responsible for performing the battery's charging process, running the MPPT algorithm and controlling the intensity of the high brightness LEDs used to form the road sign.

The solar panel was mathematically modeled and implemented in MATLAB, in order to study their current-voltage and power-voltage characteristics. Throughout the dissertation are presented the simulations results of the complete system, as well as of the autonomous photovoltaic system developed prototype.

Keywords: Renewable Energy, Solar Energy, Autonomous Photovoltaic Systems, Batteries, MPPT, high-brightness LEDs.

Índice

Agradecimentos ..... **iii**

Resumo ..... **v**

Abstract ..... **vii**

Lista de Figuras ..... **xiii**

Lista de Tabelas ..... **xxi**

Lista de Abreviaturas ..... **xxiii**

Lista de Símbolos ..... **xxv**

CAPÍTULO 1 Introdução **1**

1.1. Problemática das Energias Renováveis 1

1.2. Energia Solar Fotovoltaica em Portugal 3

1.3. Sistemas Fotovoltaicos Aplicados à Sinalização Rodoviária 6

1.4. LEDs de Alto Brilho na Sinalização Rodoviária 7

1.5. Motivações 9

1.6. Objectivos 10

1.7. Organização da Dissertação 10

CAPÍTULO 2 Painéis Fotovoltaicos **13**

2.1. Introdução 13

2.2. Sistemas Fotovoltaicos 14

2.2.1. Sistemas Fotovoltaicos Ligados à Rede Eléctrica 15

2.2.2. Sistemas Fotovoltaicos Híbridos 16

2.2.3. Sistemas Fotovoltaicos Autónomos 17

2.3. Célula Fotovoltaica 18

2.3.1. Tipos de Células Fotovoltaicas 20

2.3.2. Modelo Eléctrico de uma Célula Fotovoltaica 22

2.3.2.1. Modelo Simplificado 22

2.3.2.2. Modelo Aperfeiçoado 26

2.4. Módulos Fotovoltaicos 27

2.5. Modelo do Módulo Fotovoltaico BP SX30U no MATLAB 29
2.5.1. Curva Característica I-V e Ponto de Máxima Potência 34
2.5.2. Efeitos Meteorológicos nas Características Eléctricas dos Módulos Fotovoltaicos 36
2.5.2.1. Efeito Produzido pela Radiação Solar 36
2.5.2.2. Efeito Produzido pela Temperatura das Células 37
2.5.2.3. Efeito Produzido pelo Factor de Idealidade do Díodo 39
2.5.2.4. Efeito Produzido pelas Resistências Intrínsecas dos Módulos Fotovoltaicos 39
2.6. Conclusões 40

CAPÍTULO 3 Interface entre o Painel Fotovoltaico e a Carga 43
3.1. Introdução 43
3.2. Maximum Power Point Tracking 44
3.2.1. Técnicas de Rastreamento do MPP 46
3.2.1.1. Tensão Constante (CV) 46
3.2.1.2. Corrente de Curto-Circuito (SC) 48
3.2.1.3. Condutância Incremental (IncCond) 49
3.2.1.4. Perturbação e Observação (P&O) 52
3.3. Baterias 55
3.3.1. Tipos de Baterias 57
3.3.2. Baterias de Ácido Chumbo 58
3.3.2.1. Princípios Electroquímicos e Reacções 59
3.3.2.2. Capacidade 61
3.3.2.3. Profundidade de Descarga 63
3.3.2.4. Estado de Carga 65
3.3.2.5. Processo de Carga 66
3.3.3. Modelos de Baterias 67
3.4. Conversor CC-CC 70
3.4.1. Topologias de Conversores CC-CC 71
3.4.2. Escolha da Topologia 72
3.4.3. Conversor CC-CC *Step-Down* 73
3.4.3.1. Controlo do *Step-Down* com PWM 76
3.4.3.2. Dimensionamento do Conversor *Step-Down* 78
3.5. Conclusões 82

CAPÍTULO 4 Simulações Computacionais 85
4.1. Introdução 85
4.2. Modelo de Simulação do Sistema 86
4.3. Conclusões 97

CAPÍTULO 5 Implementação e Resultados Experimentais 99
5.1. Introdução 99
5.2. Descrição Geral do Sistema Implementado 99
5.3. Unidade de Comando 101
5.3.1. Microcontrolador 102
5.3.2. Interface PIC18F4431 com LCD Nokia 3310 104
5.3.3. Circuito Acoplador Óptico 107
5.3.4. Circuito de Medida 110
5.3.4.1. Sensor de Tensão de Efeito Hall 111
5.3.4.2. Sensor de Corrente de Efeito Hall 115
5.4. Conversor CC-CC *Step-Down* 117
5.5. Circuito MPPT 121
5.6. Controlador de Carga Baseado no Conversor *Step-Down* 125
5.7. Sistema de Iluminação - Matriz de LEDs 135
5.8. Conclusões 136

CAPÍTULO 6 Conclusões e Trabalho Futuro 139
6.1. Conclusões 139
6.2. Sugestões de Trabalho Futuro 143

Referências Bibliográficas 145

Lista de Figuras

Figura 1.1 – Diferentes formas de gerar energia através de fontes renováveis 1
Figura 1.2 - Cenário de uma possível evolução da produção mundial de energia eléctrica até 2040 [2] 3
Figura 1.3 – Mapa da radiação solar média anual em KWh/m^2 na Europa num plano horizontal [4] 4
Figura 1.4 – Evolução histórica da Energia Solar Fotovoltaica em Portugal Continental 5
Figura 1.5 – Exemplos de sinalização rodoviária alimentados por sistemas solares fotovoltaicos 7
Figura 1.6 – Composição do LED branco [10] 8

Figura 2.1 - Ligação de células fotovoltaicas: (a)série; (b) paralelo 13
Figura 2.2 - Sistemas fotovoltaicos autónomos 14
Figura 2.3 – Sistema fotovoltaico híbrido 15
Figura 2.4 - Constituição de um sistema fotovoltaico ligado à rede eléctrica 16
Figura 2.5 - Constituição de um sistema fotovoltaico híbrido 17
Figura 2.6 - Constituição de um sistema fotovoltaico autónomo 18
Figura 2.7 - Efeito fotovoltaico na junção P-N – Conversão da radiação solar em electricidade [17] 19
Figura 2.8 - Constituição interna de uma célula fotovoltaica 20
Figura 2.9 - Tipos de células fotovoltaicas: (a) Célula de silício monocristalino; (b) Célula de silício policristalino; (c) Célula de silício amorfo. 22
Figura 2.10 - Modelo simplificado do circuito equivalente de uma célula fotovoltaica 23
Figura 2.11 - Modelos ilustrando os dois principais parâmetros que caracterizam as células fotovoltaicas: (a) Isc - corrente curto-circuito; (b) Voc - tensão de circuito aberto 23
Figura 2.12 - Curva I-V da célula fotovoltaica sob 3 níveis diferentes de radiação solar a temperatura constante de 25ºC 25
Figura 2.13 - Modelo de dois díodos do circuito equivalente de uma célula

fotovoltaica 26
Figura 2.14 - Curva característica I-V de um painel genérico 28
Figura 2.15 - Módulo fotovoltaico BP SX30U 29
Figura 2.16 - Circuito equivalente utilizado para a simulação do módulo fotovoltaico BP SX30U 31
Figura 2.17 – Simulação no MATLAB da curva caracteristica I-V e respectivo MPP do módulo fotovoltaico BP SX30U (1000 W/m^2 e 25ºC) 35
Figura 2.18 – Simulação no MATLAB da curva P-V e respectivo MPP do módulo fotovoltaico BP SX30U (1000 W/m^2 e 25ºC) 35
Figura 2.19 – Curvas características I-V para várias intensidades de radiação solar incidente e temperatura do módulo igual a 25ºC 37
Figura 2.20 – Curvas P-V para várias intensidades de radiação solar incidente e temperatura do módulo a 25ºC 37
Figura 2.21 - Curvas características I-V para várias temperaturas do módulo e radiação solar incidente de 1000 W/m^2 38
Figura 2.22 - Curvas P-V para várias temperaturas do módulo fotovoltaico e radiação solar incidente de 1000 W/m^2 38
Figura 2.23 – Efeito produzido pelo factor de idealidade do dídodo nas curvas características I-V 39
Figura 2.24 - Efeito produzido pela resistência série (*Rs*) da célula fotovoltaica nas curvas características I-V 40

Figura 3.1 – Intercepção da curva característica I-V do módulo fotovoltaico com a linha da carga. 45
Figura 3.2 - Sistema fotovoltaico com um circuito MPPT à saída do painel 46
Figura 3.3 - Algoritmo MPPT da técnica Tensão Constante (CV) 47
Figura 3.4 - Algoritmo MPPT da técnica Corrente de Curto-Circuito (SC) 48
Figura 3.5 – Curva PV do módulo fotovoltaico 49
Figura 3.6 - Algoritmo MPPT da técnica Condutância Incremental (IncCond) .. 51
Figura 3.7 – Evolução da potência do módulo fotovoltaico e respectivo sentido da perturbação 53
Figura 3.8 - Algoritmo MPPT da técnica Perturbação e Obervação (P&O) 55
Figura 3.9 - Participação percentual de cada componente de um sistema fotovoltaico autónomo considerando: (a) o investimento inicial; (b) os custos anuais de cada componente de sistema 56
Figura 3.10 – Corte transverssal de uma bateria de Ácido Chumbo e

respectiva estrutura [42] 58
Figura 3.11 – Diagrama simplificado de uma bateria de ácido chumbo: (a) processo de descarga; (b) processo de carga 61
Figura 3.12 – Características das curvas de descarga para bateria de ácido chumbo, a diferentes valores de corrente de descarga a uma temperatura constante de 25ºC 62
Figura 3.13 – Efeito da temperatura ambiente em relação à capacidade da bateria ácido chumbo, para diferentes valores de corrente de descarga 63
Figura 3.14 – Capacidade das baterias de ácido chumbo em função do número de ciclos de funcionamento, para diferentes percentagens de profundidade de descarga 64
Figura 3.15 - Estado de carga e tensão de circuito aberto de uma bateria 65
Figura 3.16 – Curvas de corrente e tensão (por célula) nos 3 estágios do processo de carga de baterias de ácido chumbo 67
Figura 3.17 – Modelo de bateria e respectivo bloco de parâmetros utilizados para a simulação do sistema de armazenamento do sistema fotovoltaico 68
Figura 3.18 – Circuitos eléctricos equivalentes de uma bateria: (a) Modelo simplificado; (b) Modelo equivalente de primeira ordem; (c) Modelo Thévenin; (d) Modelo de carga e descarga [37] 70
Figura 3.19 - Topologias básicas dos conversores CC-CC: (a) Step-down, (b) Step-up e (c) Buck-boost 71
Figura 3.20 – Curva característica I-V do painel fotovoltaico a diferentes radiações solares incidentes a temperatura constante de 50ºC e faixa da região de funcionamento normal da bateria de ácido chumbo de 12V nominal 73
Figura 3.21 - Circuito eléctrico de um conversor step-down para uma carga puramente resistiva 74
Figura 3.22 – Conversor step-down nos dois estados de funcionamento: (a) perído de condução do semicondutor de potência; (b) período de não condução do semicondutor de potência 74
Figura 3.23 – Formas de onda da tensão e corrente na bobina do conversor *step-down* em modo de condução contínua 75
Figura 3.24 – Blocos e variáveis para controlo do *step-down* com PWM 77
Figura 3.25 – Comparação dos sinais $V_{control}$ e v_{st} [55] 77
Figura 3.26 – Circuito eléctrico do conversor *step-down* com controlo PWM .. 78
Figura 3.27 – Esquema eléctrico do sistema fotovoltaico implementado 79

Figura 4.1 – Visão geral do sistema simulado no Simulink 86
Figura 4.2 – Painel solar fotovoltaico BP SX30U implementado no Simulink... 87
Figura 4.3 – Curvas características do painel fotovoltaico BP SX30U (1000 W/m^2 e 25ºC): (a) curva característica I-V; (b) curva característica P-V..... 87
Figura 4.4 - Corrente gerada pelo painel fotovoltaico com variações da radiação solar 88
Figura 4.5 – Conversor *step-down* implementado para a simulação no Simulink 88
Figura 4.6 - Formas de onda da tensão de entrada e saída do conversor step-down com uma carga resistiva de 100Ω..... 89
Figura 4.7 – Formas de onda da tensão e corrente no MOSFET (*drain-source*) e corrente na bobina (i_L) 89
Figura 4.8 - Circuito MPPT, composto por dois subistemas, implementado para a simulação no Simulink..... 90
Figura 4.9 – Subsistema MPPT – P&O 91
Figura 4.10 – Tensão de saída do painel fotovoltaico controlada pelo circuito MPPT 91
Figura 4.11 – Excerto da tensão de controlo MPPT com perturbação de valor 0,1V 92
Figura 4.12 - Excerto da tensão de controlo MPPT com perturbação de valor 0,5V 92
Figura 4.13 – Circuito implementado no subsistema PWM 93
Figura 4.14 – Tensão do painel fotovoltaico controlada pelo circuito MPPT comparada com uma onda dente de serra..... 93
Figura 4.15 – Excerto do sinal de controlo PWM a aplicar ao MOSFET do conversor *step-down* 94
Figura 4.16 - Modelo genérico para baterias recarregáveis no pacote Power Systems do Simulink 94
Figura 4.17 – Bloco de parâmetros do modelo genérico da bateria 95
Figura 4.18 – Circuito equivalente do modelo genérico do Simulink durante o carregamento da bateria..... 95
Figura 4.19 - Curva de descarga da bateria 96
Figura 4.20 - Corrente que carrega a bateria 96
Figura 4.21 – Evolução do SOC durante o carregamento da bateria [59]..... 97

Figura 5.1 – Diagrama de blocos do sistema implementado..... 100

Figura 5.2 – Fonte de alimentação(30V, 3A) utilizada para emular o painel fotovoltaico 101
Figura 5.3 – Bancada de testes do sistema implementado 101
Figura 5.4 - Diagrama de blocos da unidade de comando 102
Figura 5.5 - Microcontrolador PIC18F4431 da *Microchip* 102
Figura 5.6 – Diagrama de pinos do microcontrolador PIC18F4431 [60] 103
Figura 5.7 – Programador ICD2 da *Microship* para interface do PIC com o computador 104
Figura 5.8 – Parte frontal, traseira e pinos do LCD Nokia 3310 105
Figura 5.9 – Esquema eléctrico da placa do microcontrolador PIC18F4431 . 106
Figura 5.10 - Placa da Unidade de Comando 107
Figura 5.11 - Diagrama funcional do acoplador óptico da *Hewlett Packard* HCPL-3120 108
Figura 5.12 – Esquema do circuito acoplador implementado com base no HCPL-3120 108
Figura 5.13 – Placa do circuito acoplador óptico 109
Figura 5.14 – Sinal PWM à saída do microcontrolador PIC18F4431 109
Figura 5.15 – Sinal PWM à saida do circuito acoplador óptico para aplicar ao MOSFET do conversor step-down 110
Figura 5.17 – Placa do circuito de medida 111
Figura 5.16 - Diagrama de blocos da ligação do circuito de medida com o circuito acoplador óptico 111
Figura 5.18 – Sensor de tensao de efeito *Hall* LV25-P da LEM 112
Figura 5.19 – Esquema de ligações do sensor de tensão LV25-P 112
Figura 5.20 – Fonte de alimentação utilizada para alimentar o circuito de medida 114
Figura 5.21 – Medição do valor da tensão aos terminais do painel fotovoltaico 114
Figura 5.22 – Medição do valor da tensão aos terminais da bateria 115
Figura 5.23 - Sensor de corrente de efeito *Hall* LA55-P da LEM 115
Figura 5.24 - Esquema de ligações do sensor de corrente LA55-P 116
Figura 5.25 – Medição do valor da corrente proveniente do painel fotovoltaico 117
Figura 5.26 – Medição do valor da corrente que efectua o processo de carga da bateria 117
Figura 5.27 - Conversor CC-CC *Step-Down* implementado numa

breadboard 118
Figura 5.28 - Sinal de controlo PWM com *duty-cycle* 70% a uma frequência de 20kHz 119
Figura 5.29 – Tensão na entrada e saída do conversor *Step-Down* 119
Figura 5.30 – Tensão proporcional à corrente na bobina (I_L) 120
Figura 5.31 – Tensão *drain-source* do MOSFET (V_{DS}) 120
Figura 5.32 – Tensão no díodo (V_D) 121
Figura 5.33 – Curva característica I-V de um painel solar 121
Figura 5.34 – Curva I-V do conjunto fonte de tensão e resistência 122
Figura 5.35 – Sinal PWM de *duty-cycle* de 53% no ponto de máxima potência 122
Figura 5.36 – Valores à entrada do conversor *step-down* com um sinal PWM de *duty-cycle* 53%: (a) tensão; (b) tensão proporcional à corrente 123
Figura 5.37 - Sinal PWM de *duty-cycle* de 10% abaixo do ponto de máxima potência 123
Figura 5.38 - Valores à entrada do conversor *step-down* com um sinal PWM de *duty-cycle* 10%: (a) tensão; (b) tensão proporcional à corrente 124
Figura 5.39 - Sinal PWM de *duty-cycle* de 90% acima do ponto de máxima potência 124
Figura 5.40 - Valores à entrada do conversor *step-down* com um sinal PWM de *duty-cycle* 90%: (a) tensão; (b) tensão proporcional à corrente 125
Figura 5.41 – Bateria BT-12M7.2AT da Baote utilizada na dissertação 126
Figura 5.42 – Conjunto de instruções para efectuar o processo de carga da bateria 127
Figura 5.43 – Diagrama de blocos do controlador PID paralelo [64] 129
Figura 5.44 – Fluxograma representativo do controlo PID digital aplicado ao processo de carga da bateria baseado no método dos 3 estágios 130
Figura 5.45 – Mensagem de início do controlo PID para o 1º estágio (Corrente Constante) do processo de carregamento da bateria 131
Figura 5.46 – Colocação da corrente I_{BLK} no valor de referência (0,72A) com a utilização de um reóstato na saída do conversor *step-down* 131
Figura 5.47 - Tensão proporcional à corrente que carrega a bateria (I_{BLK} = 0,72A) 131
Figura 5.48 – Tensão aos terminais da bateria quando é aplicada a corrente I_{FLOAT} no 1º estágio do processo de carga da bateria 132
Figura 5.49 – Tensão aos terminais da bateria quando o algoritmo de

controlo passa do 1º para o 2º estágio do processo de carga da bateria 132
Figura 5.50 – Sequência de mensagens amostradas no LCD durante o estágio de corrente constante para o carregamento da bateria 133
Figura 5.51 – Mensagem de início do controlo PID para o 2º estágio (Tensão Constante) do processo de carregamento da bateria 133
Figura 5.52 – Tensão aos terminais da bateria (14,4V) no 2º estágio do processo de carga..... 134
Figura 5.53 – Tensão proporcional à corrente na bateria no 2º estágio do processo de carga..... 134
Figura 5.54 - Sequência de mensagens amostradas no LCD durante o estágio de tensão constante para o carregamento da bateria 134
Figura 5.55 – Circuito eléctrico da matriz de LEDs 135
Figura 5.56 - Sinal rodoviário (sentido proibido) equipado com a tecnologia LED implementado numa *veroboard* com os LEDs apagados..... 136
Figura 5.57 - Sinal rodoviário (sentido proibido) equipado com a tecnologia LED implementado numa *veroboard* com os LEDs acesos 136

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 - Características eléctricas do módulo fotovoltaico BP SX 30U [26] 30
Tabela 3.1 - Comparação entre os diferentes tipos de baterias 57
Tabela 3.2 – Relação entre o nível de carga das baterias e a tensão [43] 59
Tabela 3.3 – Reacções químicas da bateria de ácido chumbo durante o processo de descarga 60
Tabela 3.4 – Valores dos componentes dimensionados para o conversor *Step-Down* 82
Tabela 5.1 – Especificações eléctricas dos pinos do LCD Nokia 3310 105
Tabela 5.2 – Valor dos componentes do *Step-Down* utilizados nas simulações e implementação prática 118
Tabela 5.3 – Parâmetros para uma bateria de 12V e 7,2 Ah. 126

Lista de Abreviaturas

Sigla	Descrição
ADC	Analog-to-Digital Converter
AM	Air mass
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CV	Técnica MPPT – Constant Voltage
DDP	Diferença de Potencial
DOD	Depth of Discharge
IncCond	Técnica MPPT - Incremental Conductance
HBLED	High-Brightness Light Emitting Diode
LCD	Liquid Crystal Display
LED	Light Emitting Diode
LRV	Load Reconnection Voltage
LVD	Load Voltage Disconnection
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor
MPP	Maximum Power Point
MPPT	Maximum Power Point Tracking
NOCT	Normal Operating Cell Temperature
P&O	Técnica MPPT - Perturbation and Observation
PI	Proporcional Integral
PIC	Programmable Integrated Circuit
PID	Proporcional Integral Derivativo
PWM	Pulse-Width Modulation
SC	Técnica MPPT - Corrente de curto-circuito
SOC	State of Charge
STC	Standard Test Conditions
SPI	Serial Peripheral Interface

Lista de Símbolos

Símbolo	Descrição	Unidade
a	Coeficiente de temperatura de Isc	[ºC] ou [K]
q	Carga de um electrão	[C]
k	Constante de Boltzmann	[J/K]
d	Duty cycle	[-]
K_P	Ganho proporcional	[-]
K_I	Ganho integral	[-]
K_D	Ganho derivativo	[-]
G	Radiação solar	[W/m^2]
G_0	Radiação solar nas condições de referência	[W/m^2]
T_I	Tempo integral	[-]
T_D	Tempo derivativo	[-]
T	Temperatura	[ºC] ou [K]
T_0	Temperatura da célula nas condições referência	[ºC] ou [K]
T_{ref}	Temperatura referência da célula fotovoltaica	[ºC] ou [K]
n	Factor de idealidade do díodo	[-]
I	Corrente eléctrica	[A]
I_a	Corrente proveniente do módulo fotovoltaico	[A]
i_L	Corrente através da bobine	[A]
I_{sc}	Corrente de curto-circuito	[A]
I_{mp}	Corrente no ponto de máxima potência	[A]
I_o	Corrente de saturação inversa do díodo	[A]
I_d	Corrente através do díodo	[A]
$I_{sc}\|_G$	Corrente de curto-circuito a uma dada radiação solar	[A]
$I_o\|_T$	Corrente de saturação inversa a uma dada temperatura	[A]
I_{PN}	Corrente nominal no primário do sensor de tensão e corrente	[A]
I_{SN}	Corrente nominal no secundário do sensor de tensão e corrente	[A]

I_{BAT}	Corrente da bateria	[A]
I_{TRIC}	Corrente mínima da bateria	[A]
I_{BLK}	Corrente máxima da bateria	[A]
N	Nº de enrolamentos no primário do sensor de corrente	[-]
V	Tensão	[V]
V_a	Tensão proveniente do módulo fotovoltaico	[V]
Vi	Tensão de entrada do conversor CC-CC	[V]
Vc	Tensão de controlo	[V]
Vo	Tensão de saída do conversor CC-CC	[V]
V_{oc}	Tensão de circuito aberto do painel fotovoltaico	[V]
V_{mp}	Tensão no ponto de máxima potência do painel fotovoltaico	[V]
V_d	Tensão aos terminais do díodo	[V]
V_{BAT}	Tensão na bateria	[V]
V_{FLOAT}	Tensão máxima na bateria	[V]
V_{OFF}	Tensão mínima na bateria	[V]
V_{OCT}	Tensão máxima de valor de sobrecarga na bateria	[V]
Ns	Número de células em série	[-]
Np	Número de células em paralelo	[-]
P	Potência	[W]
Pa	Potência de saída do módulo fotovoltaico	[W]
P_{MAX}	Potência máxima nominal	[W]
P_o	Potência à saída do conversor	[W]
P_T	Potência consumida pelos elementos de comutação do conversor CC-CC	[W]
R_S	Resistência série	[Ω]
R_P	Resistência paralela	[Ω]
R_{POT}	Resistência de potência	[Ω]

CAPÍTULO 1

Introdução

1.1. Problemática das Energias Renováveis

A energia eléctrica é um recurso indispensável no desenvolvimento económico e social das sociedades. Contudo, o aumento sustentado do seu custo, nas suas diversas formas, e as questões ambientais relacionadas com o seu consumo, evidenciam a necessidade na adopção de novas formas de gerir este recurso. A maneira como se consome a energia pode contribuir para aliviar a pressão que se exerce sobre a natureza. Desta forma, o futuro do planeta está cada vez mais nas "mãos" do ser humano. É neste contexto que surgem as Energias Renováveis, que são energias obtidas a partir de fontes naturais, capazes de se restaurar e dessa forma virtualmente inesgotáveis. Como mais habituais tem-se a energia solar, eólica, hídrica, das ondas, geotérmica e a biomassa, ilustradas na Figura 1.1. As Energias Renováveis estão disponíveis em todos os países, ainda que com recursos e potenciais diferentes.

Figura 1.1 – Diferentes formas de gerar energia através de fontes renováveis

No sector da energia, faz parte dos objectivos dos governos de vários países a aposta na produção e utilização das energias renováveis, com a implementação de um conjunto de medidas, como a redução da factura energética, o alcançar de rendimentos extras com a venda de energia produzida para a rede, com o intuito de promover a autonomia energética do país e diminuir a dependência das fontes de energia tradicionais, como são o

petróleo, o carvão e o gás natural.

O Sol é a principal fonte de energia, responsável pela manutenção das variadas formas de vida existentes na Terra. Trata-se de um recurso que fornece anualmente, para a atmosfera terrestre, uma quantidade de energia avaliada em $1,5x10^{18}$kWh, que corresponde no mesmo período a 10000 vezes o consumo mundial de energia [1]. Todavia, apesar dos números elevados, esta fonte de energia é considerada dispersa. Num dia de céu limpo, a radiação solar, depois de cruzar a atmosfera atinge a superfície terrestre com uma potência inferior em cerca de 30% da registada no topo da mesma, com um valor a rondar os 1000W/m^2. Esta radiação que atinge o solo é constituída por três elementos: radiação directa, que toca directamente a superfície, radiação difusa, que é desviada em diferentes direcções pelos componentes da atmosfera e a radiação reflectida, proveniente da reflexão no solo de objectos circundantes. A radiação solar tem uma distribuição espectral constituída por raios ultra-violetas (7%), luz visível (47%) e raios infra-vermelhos (46%) [1].

Com base nas potencialidades proporcionadas pelo Sol, a energia solar é a fonte de energia limpa mais promissora e uma das melhores respostas à actual dependência das fontes de energia tradicionais. A energia solar é utilizada para produzir calor ou electricidade através de colectores ou painéis solares fotovoltaicos, respectivamente. A energia solar fotovoltaica converte a energia solar directamente em corrente eléctrica através de materiais semicondutores, como o silício. Actualmente, o foco mais importante da oferta energética do sector é nas centrais fotovoltaicas. Porém, esta maneira de gerar energia eléctrica é da mesma forma interessante na perspectiva da produção descentralizada, ao nível da micro e da minigeração. Esta produção pode ser integrada na rede eléctrica, através de sistemas em edifícios e espaços urbanos, mas a produção descentralizada é mais atractiva em sistemas independentes da rede eléctrica, sendo uma solução para a electrificação de locais remotos, sistemas de bombagem, alimentação de sistemas de sinalização e urgência, entre outros.

A Energia Solar Fotovoltaica, a nível mundial conhece desde há aproximadamente 10 anos um crescimento anual de cerca 30% (Figura 1.2), estimulada por políticas de incentivo, com destaque na Alemanha e no Japão. Contudo, a viabilidade da entrada em larga escala no mercado da energia depende da evolução das tecnologias no sentido da redução do seu custo [2].

A Figura 1.2 apresenta um cenário de uma possível evolução da produção mundial de energia até 2040. Outro factor interessante que se verifica nesta figura é a previsão do crescimento brutal da energia solar fotovoltaica a partir de 2020, tornando-se uma das grandes formas de produção de energia eléctrica, como referido anteriormente.

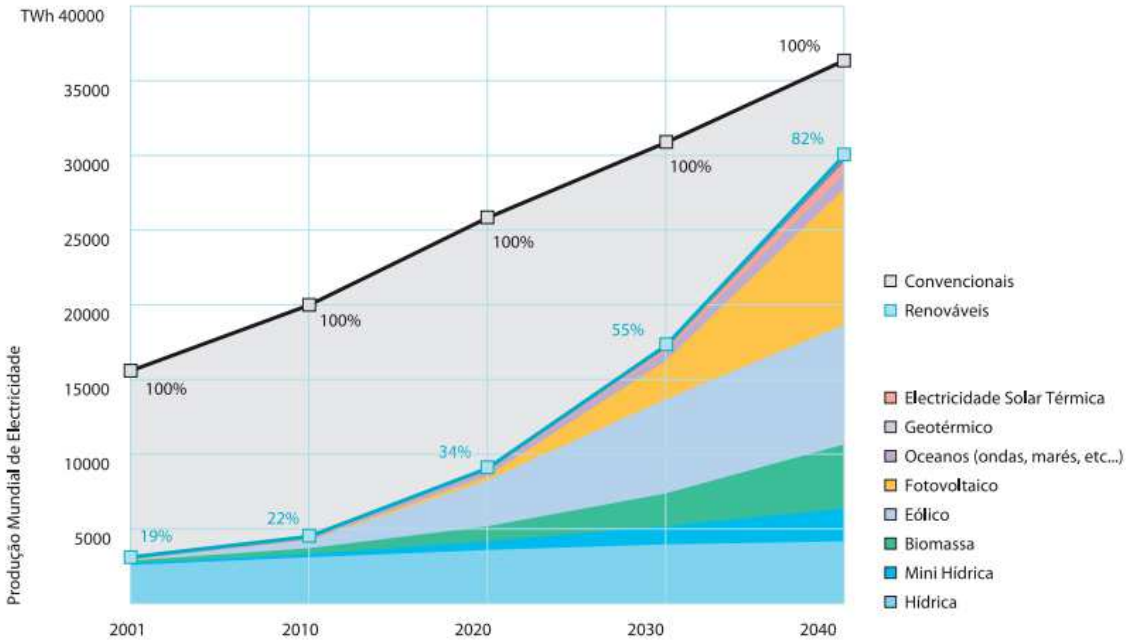


Figura 1.2 - Cenário de uma possível evolução da produção mundial de energia eléctrica até 2040 [2]

1.2. Energia Solar Fotovoltaica em Portugal

Portugal é um país muito dependente do exterior do ponto de vista energético, pois não possui praticamente combustíveis fósseis. Contudo, existem abundantes recursos energéticos renováveis, que cada vez mais tendem a ser explorados. Na Europa, Portugal é um dos países com maior disponibilidade de radiação solar, como mostra a Figura 1.3. A insolação (número de horas de sol descoberto acima do horizonte) em Portugal Continental é um elemento climático extremamente marcante que varia entre as 1800 e as 3100 horas de sol por ano [3]. Desta forma, pode afirmar-se que Portugal dispõe de uma situação privilegiada para o desenvolvimento deste tipo de energia e a sua exploração tem tendência a crescer ao longo dos anos.

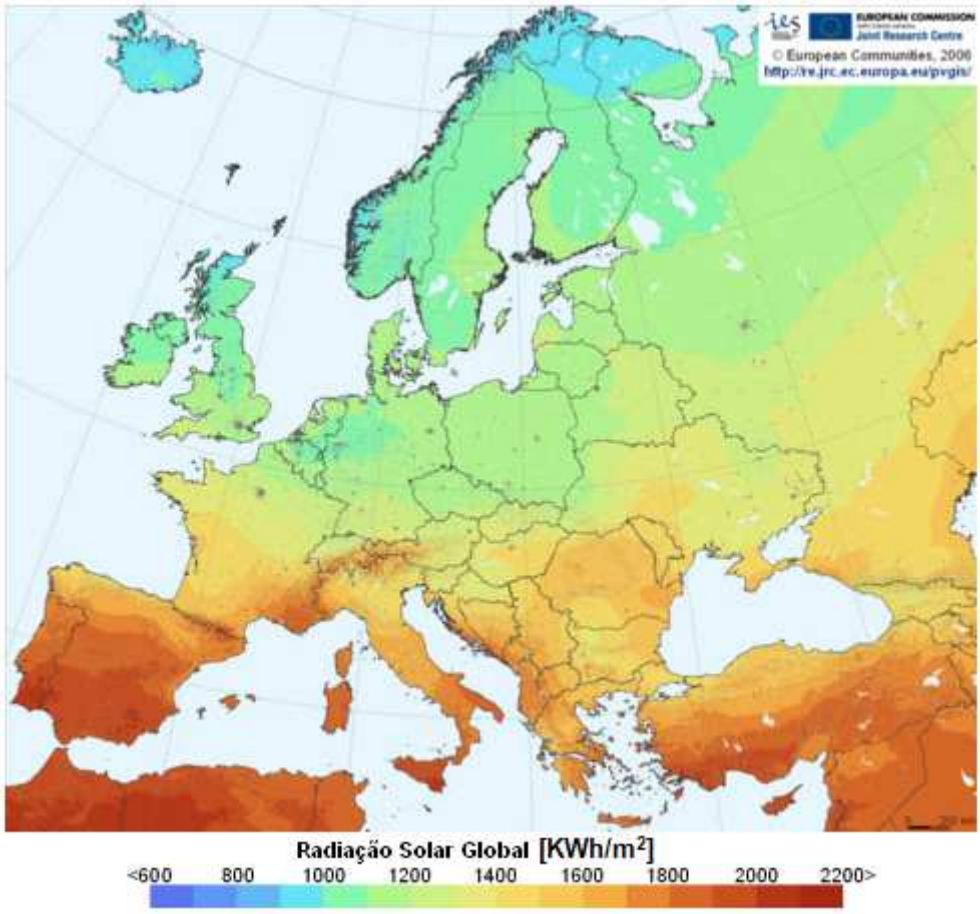


Figura 1.3 – Mapa da radiação solar média anual em kWh/m^2 na Europa num plano horizontal [4]

A União Europeia elaborou uma iniciativa, designada 20-20-20, no seguimento das discussões relacionadas com as alterações climáticas, que consiste em aumentar o peso das energias renováveis na Europa e dessa forma reduzir as emissões de dióxido de carbono e melhorar a eficiência energética em 20%, até 2020. Portugal, para ajudar a cumprir essa meta, aumentou a electricidade produzida a partir de fontes renováveis dos 43% em 2008, para 45% em 2010 e estima-se os 59% em 2020, o que significa um crescimento significativo ao longo dos vários anos. Embora ainda não apresente grande impacto no sistema eléctrico nacional a energia solar fotovoltaica pode ter grande colaboração nesse crescimento, tendo produzido 41,4GWh em 2008, 159,9GWh em 2009 e 213,3GWh em 2010 [5], o que representa uma evolução bastante significativa, com tendência para continuar nos anos seguintes, como se pode verificar pelo gráfico da Figura 1.4.

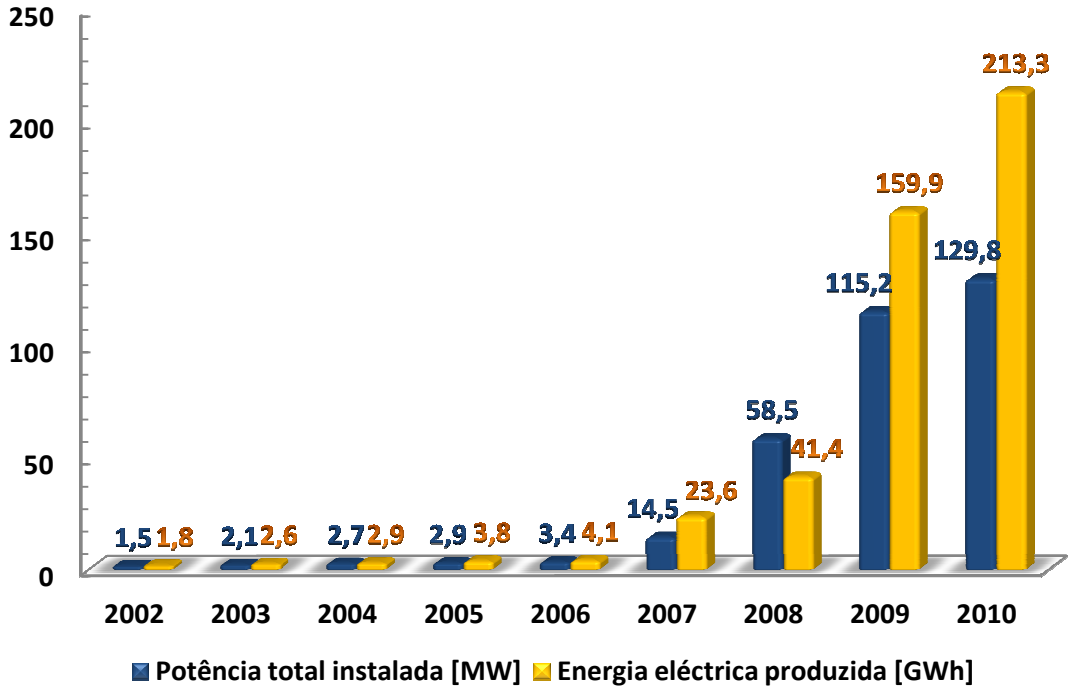


Figura 1.4 – Evolução histórica da Energia Solar Fotovoltaica em Portugal Continental

Em Portugal, usualmente grande parte dos sistemas solares fotovoltaicos são utilizados em sinalização rodoviária, em centros florestais, ou em parquímetros, ou seja, ao nível da produção descentralizada. Corria o ano de 2007 quando o governo português simplificou o processo de microgeração por parte de particulares, podendo qualquer consumidor de energia eléctrica passar a ser produtor e vender o excesso à Rede Eléctrica Nacional. Em Maio de 2010 já se encontravam certificados cerca de 7000 produtores, que correspondem a uma produção total de 24MW [6]. Ao abrigo do regime da microprodução, os Jardins de São Bartolomeu em Lisboa, inauguraram a 18 de Março de 2009 16 unidades de microprodução, tornando-se no maior microprodutor nacional, com a instalação de 288 painéis fotovoltaicos correspondentes a uma potência de pico de 58,8kW, e uma produção eléctrica de 80 MWh/ano [6]. Evidenciam-se ainda entre os pequenos produtores a Escola Alemã de Lisboa com 24,75kW e o Palácio de Belém com uma potência de pico de 20kW [7].

No que diz respeito a produção de energia eléctrica centralizada, Portugal possui na zona do Alentejo duas centrais fotovoltaicas. No distrito de Beja, a central fotovoltaica de Serpa ocupa uma área de 60 hectares numa das zonas de Portugal onde se verificam os valores mais elevados de radiação solar. Esta

central contém 52000 painéis fotovoltaicos com uma potência total instalada de 11MWp e a energia eléctrica produzida anualmente é suficiente para alimentar cerca de oito mil habitações e quintas na região [8]. Situada na freguesia da Amareleja, concelho de Moura, a central fotovoltaica de Moura é considerada uma das maiores do mundo, numa área de 130 hectares com 376632 painéis solares com uma potência total instalada de 62MWp. Além das duas centrais referidas anteriormente, existem outras de menor dimensão ainda em fase de construção no Baixo Alentejo, nomeadamente o parque solar de Almodôvar e três no concelho de Ferreira do Alentejo. No concelho de Mértola, a central fotovoltaica de Olva com a potência de 500kWp e a central da Corte Pão e Água com 756kWp também se destacam na produção de energia solar fotovoltaica centralizada. Em Setúbal, uma instalação de 10kWp, propriedade da EDP, foi a pioneira na ligação de sistemas fotovoltaicos à rede eléctrica.

1.3. Sistemas Fotovoltaicos Aplicados à Sinalização Rodoviária

As aplicações de média potência relacionadas com sistemas fotovoltaicos ou em associação com outras fontes de energia renovável são um mercado em plena ascensão, estando a tornar-se cada vez mais competitivos para alimentação de certos locais remotos onde as soluções alternativas convencionais (geradores diesel ou rede eléctrica) ficam aquém sob o ponto de vista económico e ainda apresentam alguns inconvenientes ambientais.

Na circulação rodoviária interagem três elementos: o homem, com características físicas e estados psicológicos, o veículo, que exibe particularidades dimensionais e operacionais diferentes e a via pública que, consoante as funções que lhe são requeridas, ostenta da mesma forma uma diversidade grande de características [9]. Não compete à sinalização do trânsito corrigir as imperfeições da via, sobretudo de concepção e construção, mas sim funcionar como um sistema de “comunicação” entre a estrada e o condutor. A eficácia deste sistema depende da qualidade com que a sinalização é projectada e pela qualidade de recepção por parte do condutor. De maneira a minimizar a falta de eficácia destes sistemas a sinalização rodoviária deverá ser simples, uniforme, homogénea e coerente. Neste sector, uma sinalização urbana com as características anteriormente especificadas deverá proporcionar uma boa fluidez do trânsito, garantindo em simultâneo

uma maior segurança rodoviária de forma a reduzir a sinistralidade, flagelo que tanto tem preocupado as entidade associadas a este tipo de causas. A utilização de LEDs na sinalização rodoviária é uma tecnologia cada vez mais utilizada, tendo vindo a substituir as lâmpadas convencionais utilizadas nos sinais de trânsito. Esta tecnologia, tem, entre outras vantagens, garantir uma maior e melhor visibilidade diurna e nocturna, em condições normais, mas principalmente em condições adversas.

Além da observância destes princípios, os dispositivos utilizados na sinalização rodoviária podem ser combinados e alimentados por sistemas solares fotovoltaicos, pois além de desempenharem as funções necessárias, apresentam baixo consumo de energia. Outro factor importante para optar por esta combinação é que em locais remotos é economicamente mais viável adaptar um sistema que combine estas tecnologias, dispensando assim uma ligação à rede eléctrica. A Figura 1.5 ilustra alguns exemplos de sinais de trânsito, um no caso com a utilização de LEDs, alimentados por sistemas solares fotovoltaicos.

Figura 1.5 – Exemplos de sinalização rodoviária alimentados por sistemas solares fotovoltaicos

1.4. LEDs de Alto Brilho na Sinalização Rodoviária

A tecnologia LED (*Light Emitting Diode*) tem sofrido nas últimas décadas uma melhoria bastante significativa e as aplicações que utilizam LEDs têm enfrentado uma grande revolução, avançando de maneira cada vez mais célere para conceber e inovar a iluminação de vários ambientes, disponibilizando integração, flexibilidade e os mais variados efeitos para consumidores exigentes e criativos. Esta tecnologia é também impulsionada devido ao surgimento de mais categorias de LEDs para além do típico LED indicador, onde se enquadra o LED de alto brilho (HBLED). As principais preocupações,

nos últimos anos, passam por investigar novas técnicas produtivas para aumentar o brilho e diminuir a decadência dos LEDs, sendo que estas inovações já permitem aos painéis luminosos manterem-se em funcionamento durante vários anos sem necessidade de substituir os LEDs. Desta forma, várias aplicações que incorporavam lâmpadas incandescentes são agora de domínio dos LEDs, como são exemplo disso os sinais de trânsito, painéis luminosos de cores plenas, entre outros. Os pontos fortes da tecnologia LED são a alta visibilidade tanto de dia como de noite, alta eficiência, pois maior percentagem de energia eléctrica é convertida em luz, reduzindo o consumo de energia, a longa vida de operação, baixo peso e espessura, grande gama de potência e grande variedade do espectro de cores. A Figura 1.6 ilustra a composição do LED branco de alto brilho, onde o emissor de luz se encontra colocado estrategicamente num reflector cúbico composto por partículas de fósforo amarelo.

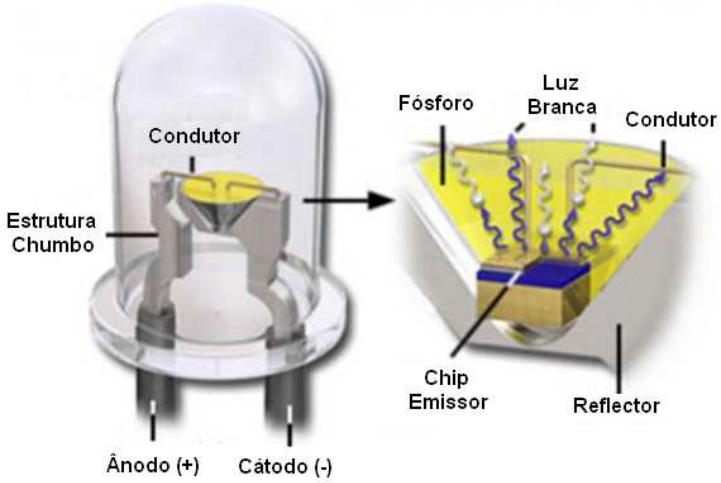


Figura 1.6 – Composição do LED branco [10]

Em muitos países a baixa eficiência energética decorrente do uso de lâmpadas incandescentes na sinalização rodoviária tem vindo a ser melhorada pela solução que a tecnologia LED permite. Esta tecnologia, como alternativa às lâmpadas incandescentes, indica em experiência efectuadas em campo e laboratórios, grandes economias de energia, maiores condições de segurança no trânsito, com maior visibilidade em condições normais e adversas, e menores custos de manutenção [11].

Os Estados Unidos da América, desde 1992 que tem remodelado a sinalização rodoviária, substituindo as lâmpadas incandescentes por LEDs e obtendo alto índice de aprovação com a iniciativa. A cidade de San Diego é

pioneira na instalação, em larga escala, da tecnologia LED na sinalização rodoviária com a substituição de mais de 32000 lâmpadas incandescentes em LEDs, sendo que todos os módulos vermelhos e mais de 90% dos módulos verdes foram alterados, desde 1997, poupando mais de US$800000 anualmente em custos de energia, pagando o investimento feito em 2 anos [12].

Em Espanha, a cidade de Santander foi das primeiras a instalar uma sinalização rodoviária baseada em LEDs, aproveitando um programa estatal que solicitou a substituição de 3623 unidades, o que permitiu que todos os semáforos da cidade fossem alterados [11].

A Câmara Municipal de Cascais, impulsionada pela Agência Municipal Cascais Energia, apresentou no dia 20 de Janeiro de 2011 a conclusão do projecto “Cascais Semáforo Eficiente”, no âmbito do Plano de Promoção de Eficiência Energética, com a apresentação do último semáforo a utilizar a tecnologia LED, que já abrange todos os semáforos do concelho. O objectivo principal deste projecto foi substituir 1247 lâmpadas incandescentes por LEDs, proporcionando uma redução de consumo energético de 80%, que se traduz numa poupança de 52500€/ano [13]. Esta iniciativa coloca a cidade de Cascais em primeiro plano, a nível nacional. Este tipo de medidas foi também aplicado à Baixa Pombalina, proposta pela Lisboa E-Nova Agência Municipal de Energia e Ambiente de Lisboa, com a substituição de 751 lâmpadas em 295 semáforos, passando Lisboa a contar com 353 semáforos instalados com a tecnologia LED [14]. Em Portugal, várias autarquias já tomaram as mesmas iniciativas, embora numa escala menor.

1.5. Motivações

As motivações associadas a esta dissertação são variadas, desde o desenvolvimento dos conhecimentos adquiridos ao longo do curso de Engenharia Electrónica Industrial e Computadores, com focalização numa das áreas de especialização como são os sistemas de energia e a electrónica de potência congregada com a área de controlo e automação, outra especialização. O interesse por tudo que envolve o âmbito das Energias Renováveis juntamente com um sistema para armazenamento de energia, normalmente baterias, destacou-se como motivação principal deste trabalho. A escolha pela Energia Solar Fotovoltaica, em detrimento de outras fontes de

energia renováveis, deveu-se essencialmente ao tipo de sistema a alimentar e ao facto de implementar um sistema autónomo, ou seja, que trabalhe independentemente da rede eléctrica. Os sistemas de iluminação, no caso um sistema rodoviário com base na tecnologia LED, cada vez mais utilizada e muito em voga nos dias de hoje, é outra parcela importante no que toca às motivações desta dissertação.

Frequentemente, os sistemas fotovoltaicos antes de serem implementados necessitam de um estudo pormenorizado com o intuito de dimensionar os seus componentes, seguindo-se uma simulação com ferramentas computacionais para estudar os resultados relativos aos mesmos. Assim, a ampliação do conhecimento, quer em ferramentas computacionais anteriormente utilizadas quer em ferramentas que suscitem uma novidade, representa também numa motivação suplementar ao desenvolvimento desta dissertação de mestrado.

1.6. Objectivos

O objectivo fundamental deste trabalho foi a simulação seguido do estudo e implementação prática de um sistema de alimentação para um módulo de iluminação rodoviário autónomo tendo como fonte de energia um painel solar fotovoltaico. De modo a efectuar o interface entre os vários módulos do sistema é necessário seguir alguns passos, que são: modelar matematicamente, com base no circuito eléctrico equivalente, uma célula fotovoltaica para o estudo das características I-V e P-V do módulo fotovoltaico; desenvolvimento de um circuito MPPT que optimize a extracção de energia produzida através de um circuito que faz com que o painel opere no ponto de máxima potência; desenvolvimento de um conversor CC-CC para controlo do processo de carga e descarga de uma bateria; desenvolvimento de um conversor CC-CC para controlo da intensidade luminosa de uma matriz de LEDs de alto brilho; desenvolvimento de um sistema de aquisição dos valores da tensão e corrente provenientes do painel fotovoltaico e da bateria e implementação de um sistema de controlo e respectivas interfaces.

1.7. Organização da Dissertação

A dissertação está dividida em seis capítulos e encontra-se organizada da seguinte forma:

No capítulo introdutório é realizado um enquadramento dos temas da dissertação, assim como as principais motivações e objectivos da mesma.

No segundo capítulo são apresentados os tipos de sistemas fotovoltaicos e os fundamentos das células e dos painéis fotovoltaicos apresentando-se a modelação das mesmas através dos circuitos eléctricos equivalentes.

Seguidamente, no capítulo três, é descrito e analisado o funcionamento dos principais algoritmos para o rastreamento do ponto de máxima potência proveniente dos painéis fotovoltaicos. É explicado o funcionamento das baterias sob o ponto de vista da modelação e, é feita a comparação entre as diferentes tecnologias de construção de baterias e respectivos modelos. São estudadas as principais características das baterias de ácido chumbo. Neste capítulo, são ainda confrontadas as topologias de conversores estáticos CC-CC que melhor se podem enquadrar no sistema fotovoltaico desenvolvido. O conversor *step-down* é dimensionado e modelado com o objectivo de se efectuar uma simulação do mesmo para posterior montagem prática.

No capítulo quatro são apresentadas as diversas simulações computacionais do sistema de iluminação de sinais de trânsito alimentado por um painel fotovoltaico.

No quinto capítulo é elaborada a implementação prática do sistema e são expostos os resultados experimentais que demonstram o desempenho da unidade de controlo que foi implementada e do conversor *step-down* a funcionar como seguidor do ponto de máxima potência, como controlador do processo de carga e descarga da bateria e como elemento de interface para controlar a luminosidade da matriz de LEDs de alto brilho.

Finalmente, no capítulo seis são apresentadas as conclusões finais da dissertação bem como um conjunto de propostas para trabalhos a desenvolver futuramente.

CAPÍTULO 2

Painéis Fotovoltaicos

2.1. Introdução

Os painéis ou módulos fotovoltaicos são constituídos por células fotovoltaicas que convertem a energia de uma fonte luminosa (geralmente o sol) em energia eléctrica [15].

As células fotovoltaicas isoladamente têm capacidade limitada de produção de energia eléctrica e fornecem um baixo nível de tensão. Sendo necessário uma maior produção de energia é fundamental associar várias células. As células fotovoltaicas são agrupadas em série, ou em paralelo (Figura 2.1), de maneira a conferirem as características eléctricas desejadas para o painel [15]. Os painéis fotovoltaicos podem, também, ser ligados entre si, formando-se os arranjos fotovoltaicos.

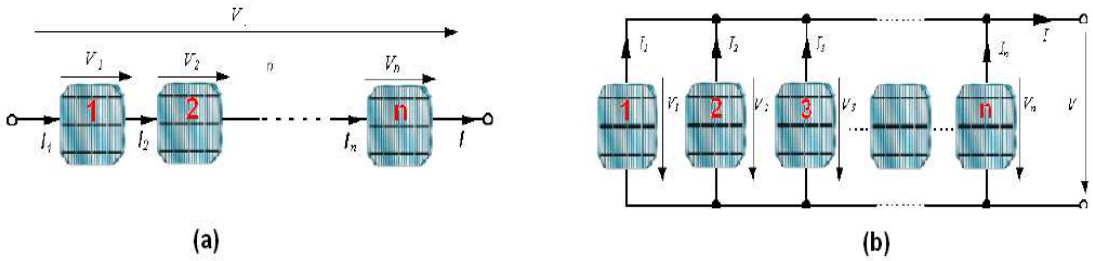


Figura 2.1 - Ligação de células fotovoltaicas: (a)série; (b) paralelo

Este capítulo aborda essencialmente os fundamentos das células fotovoltaicas e a modelação de uma célula fotovoltaica utilizando um circuito eléctrico equivalente. Os modelos foram modelados matematicamente e implementados no MATLAB para o estudo das características das células e para simular um módulo fotovoltaico real. Neste capítulo são ainda referidas as configurações utilizadas para gerar energia através de painéis solares

fotovoltaicos, recaindo a preocupação central nos sistemas fotovoltaicos isolados e nos componentes que o compõem. Os sistemas de sinalização rodoviária combinados com os sistemas fotovoltaicos, normalmente abdicam da ligação à rede eléctrica, evitando escavações e obras muito elaboradas.

2.2. Sistemas Fotovoltaicos

Os sistemas fotovoltaicos são geralmente classificados de acordo com as suas exigências funcionais e operacionais, com a configuração dos seus variados componentes e como o equipamento está ligado a outras fontes de energia e a cargas eléctricas. Os sistemas fotovoltaicos podem ser projectados para fornecer corrente continua (CC) e/ou corrente alternada (CA), podendo funcionar interligados com a rede eléctrica ou independente da mesma, como podem ser conectados com sistemas de armazenamento de energia e com outras fontes de energia. Assim, os sistemas fotovoltaicos podem ser aplicados em diversas situações, todavia as duas principais classificações são sistemas ligados à rede eléctrica e sistemas autónomos. A Figura 2.2 ilustra três diferentes aplicações de sistemas fotovoltaicos autónomos. Com a ligação de painéis fotovoltaicos com outras fontes de energia surge outra configuração importante a ser considerada que se designa por sistemas fotovoltaicos híbridos. A Figura 2.3 mostra um sistema fotovoltaico híbrido com ligação à rede eléctrica.

Cada configuração acima citada poderá ser de complexidade variável e fazer uso de componentes diversos. Desta forma a opção por qualquer uma delas dependerá da aplicação do sistema e da disponibilidade de recursos energéticos.

Figura 2.2 - Sistemas fotovoltaicos autónomos

Figura 2.3 – Sistema fotovoltaico híbrido

2.2.1. Sistemas Fotovoltaicos Ligados à Rede Eléctrica

Os sistemas fotovoltaicos ligados à rede eléctrica, como o ilustrado no diagrama de blocos da Figura 2.4, normalmente fazem uso de um número considerável de painéis fotovoltaicos. Estes sistemas habitualmente não utilizam elementos armazenadores de energia, pois toda a energia gerada é injectada na rede através de um inversor que serve de interface entre o painel e a rede, ajustando as formas de onda das grandezas eléctricas CC do painel às formas de onda CA exigidas pela rede.

Este tipo de sistemas configuram-se na realidade como uma pequena central de produção de energia eléctrica e com isso tem vindo a ganhar cada vez mais relevo na sociedade actual, contando actualmente com muitos utilizadores, pois existe uma aposta estratégica nas energias renováveis anunciadas pelos Governos, como referido anteriormente. A energia que é gerada pelos sistemas fotovoltaicos que estão ligados à rede eléctrica ou é consumida pelo utilizador ou é injectada na rede. No caso da injecção directa na rede e com base nos incentivos referidos anteriormente a entidade fornecedora de energia eléctrica paga a energia gerada com tarifas atractivas e rentáveis dependendo das normas dos Países que já providenciaram a regulamentação do sector. Desta forma, estas compensações vão ajudando a pagar o custo da instalação inicial do sistema.

Normalmente, aos sistemas fotovoltaicos ligados à rede eléctrica é aplicado um circuito de controlo que permite maximizar a potência produzida pelo painel fotovoltaico. Esse controlo é designado por circuito MPPT (*Maximum Power Point Tracking*) e será estudado profundamente no Capítulo 3 desta dissertação.

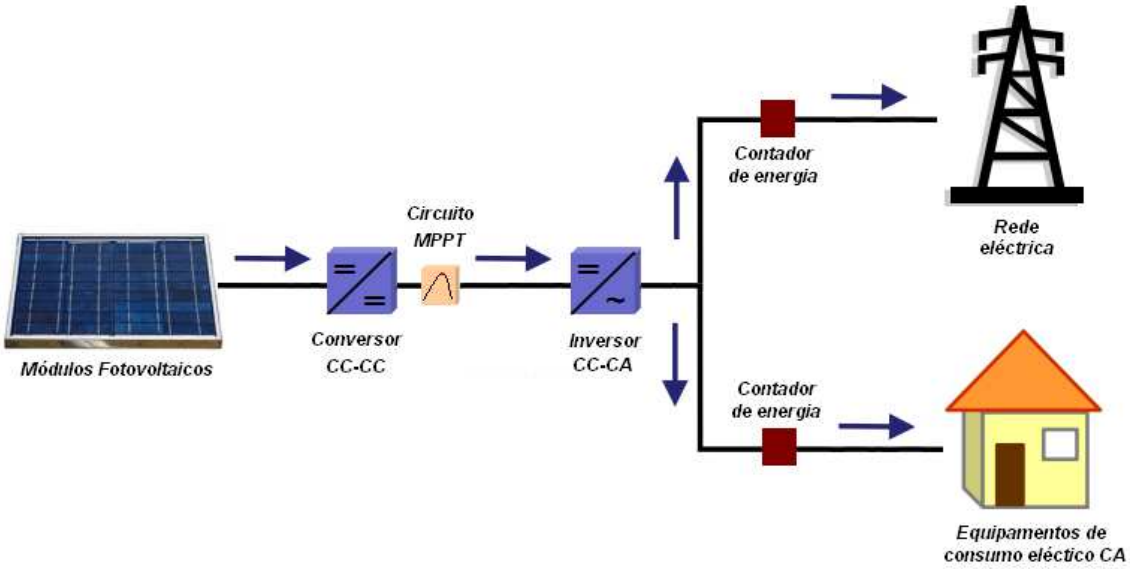


Figura 2.4 - Constituição de um sistema fotovoltaico ligado à rede eléctrica

2.2.2. Sistemas Fotovoltaicos Híbridos

Os sistemas fotovoltaicos híbridos, que podem ser ilustrados com base no diagrama de blocos da Figura 2.5, são aqueles que desconectados da rede eléctrica, apresentam em conjunto várias fontes de geração de energia renováveis combinadas com a geração através de módulos fotovoltaicos, como por exemplo turbinas eólicas. Com a utilização de várias formas de geração de energia eléctrica estes sistemas tornam-se complexos na optimização do uso das energias. Desta forma, é necessário um controlo de todas as fontes para haver máxima eficiência na entrega de energia às cargas.

Tipicamente, estes sistemas além da bateria, do controlador de carga e do inversor pode ser necessário um meio de produção convencional, tipo gerador diesel, servindo de reserva e apoio auxiliar ao sistema em períodos em que o consumo de electricidade exigido é superior ao produzido a partir das fontes renováveis.

Assim como nos sistemas fotovoltaicos, também os geradores eólicos devem fazer uso de um circuito de controlo MPPT para extrair a máxima potência.

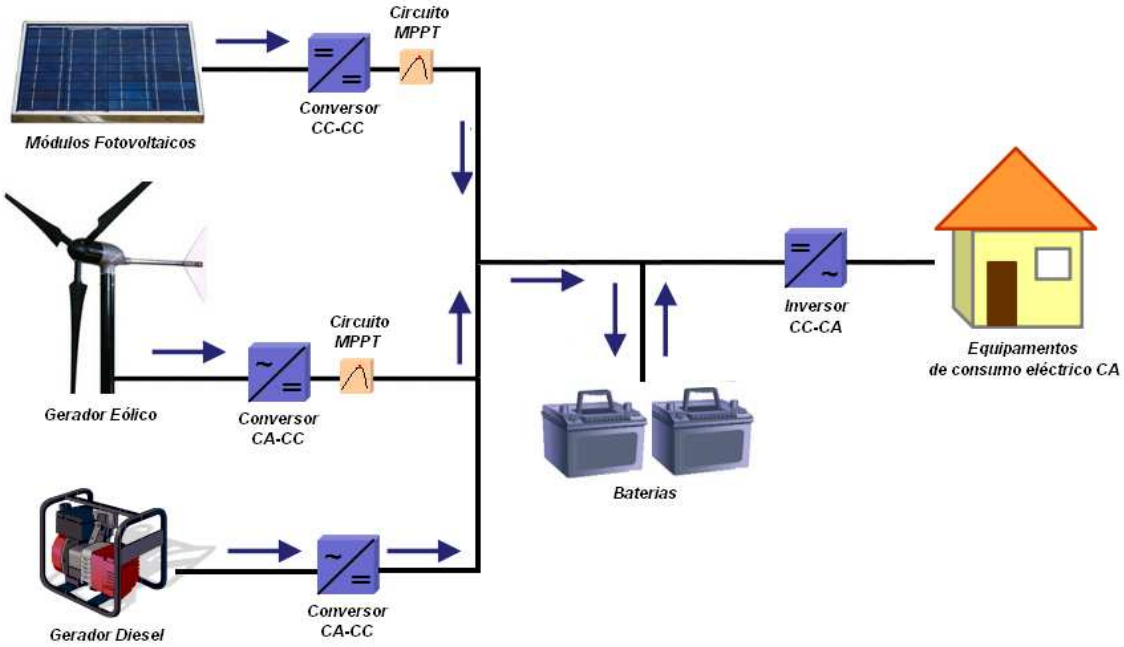


Figura 2.5 - Constituição de um sistema fotovoltaico híbrido

2.2.3. Sistemas Fotovoltaicos Autónomos

Os sistemas fotovoltaicos autónomos (Figura 2.6), muitas vezes denominados também por sistemas fotovoltaicos isolados, não se encontram ligados à rede eléctrica convencional. Actualmente, estes sistemas permitem o abastecimento de energia eléctrica em locais remotos de difícil acesso, que se encontram afastados da rede. Este tipo de aproveitamento solar é extremamente útil e na grande maioria das vezes é empregue em sistemas de baixa/média potência, utilizados por exemplo para iluminação, bombeamento de água para irrigação em zonas agrícolas, sistemas de vigilância em auto-estradas, sistemas de vigilância em matas, sinalização rodoviária, entre outros.

Um sistema fotovoltaico isolado caracteriza-se por possuir como fonte primária apenas a energia gerada pelos painéis fotovoltaicos. Assim, neste modelo de sistemas torna-se essencial utilizar elementos armazenadores de energia, normalmente baterias, para garantir o fornecimento de energia durante a noite e em períodos que a radiação solar seja diminuta ou inexistente. Para administrar o carregamento/descarregamento das baterias utiliza-se um controlador de carga e no caso de existirem cargas que operem com CA é imprescindível usar um inversor CC-CA para converter a corrente contínua em alternada.

Estes sistemas fotovoltaicos, como são autónomos, impõem que haja

uma optimização no aproveitamento da energia solar e no armazenamento da energia de reserva, para conseguir alcançar sustentabilidade técnica e económica. Devido ao custo inicial da instalação e à baixa eficiência dos módulos fotovoltaicos é necessário aumentar a eficiência do sistema. Para reduzir os custos da energia gerada é fundamental garantir que o sistema opere o maior tempo possível no ponto de máxima potência dos painéis. Dessa forma, para optimizar a potência produzida pelos módulos fotovoltaicos, aos sistemas fotovoltaicos isolados é também aplicado um circuito de controlo MPPT.

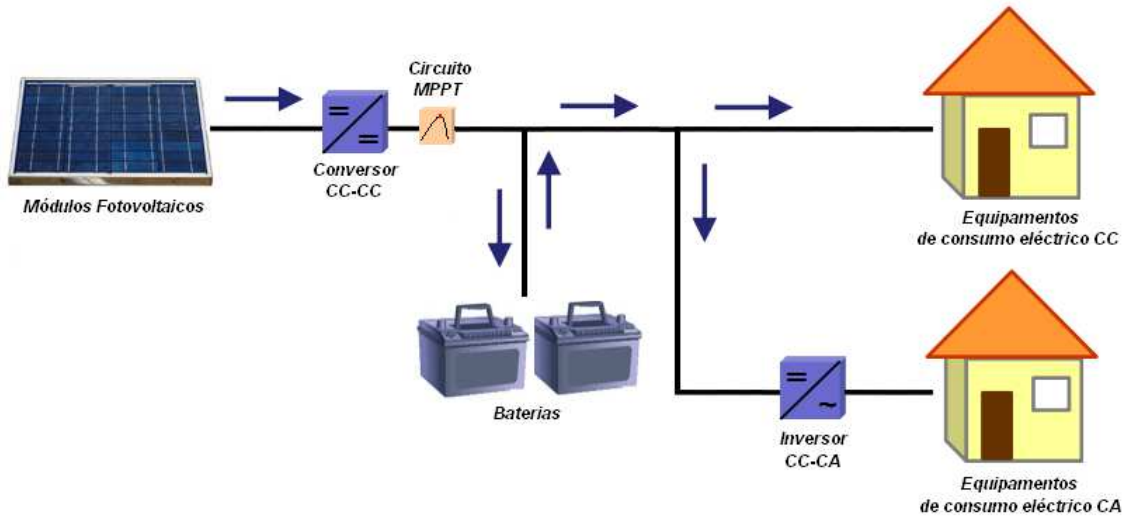


Figura 2.6 - Constituição de um sistema fotovoltaico autónomo

2.3. Célula Fotovoltaica

As células fotovoltaicas tipicamente são constituídas por materiais semicondutores como o silício, o arsenieto de gálio, telurieto de cádmio ou disselenieto de cobre e índio. A mais comum e usual é a célula de silício (Si), utilizada em 95% dos casos. O silício apresenta uma disponibilidade quase ilimitada, e pode ser encontrado na natureza de diversas formas, frequentemente como areia, mas nunca como silício puro [16].

O silício cristalino não é um bom condutor de electricidade, desse modo é submetido a um processo de dopagem, onde são empregues impurezas que vão estimular as propriedades eléctricas do mesmo. As impurezas tipicamente utilizadas neste tipo de processos são o boro e o fósforo.

Unindo ao silício cristalino átomos de boro e de fósforo obtém-se uma junção P-N, Figura 2.7, que gera um campo eléctrico, isto é, uma ddp entre as duas zonas da célula. Na junção P-N o que ocorre é que os electrões livres no semicondutor, do tipo N, passam para o lado do P onde se combinam com as lacunas desse semicondutor, fazendo com que haja um excesso de electrões na zona tipo P, tornando-a negativamente carregada e uma redução de electrões na zona tipo N, levando a que fique electricamente positiva. Este desequilíbrio de cargas que acontece na fronteira da junção P-N dá origem a um campo eléctrico que dificulta a passagem de electrões da zona tipo N para a do tipo P, e assim uma situação de equilíbrio é atingida.

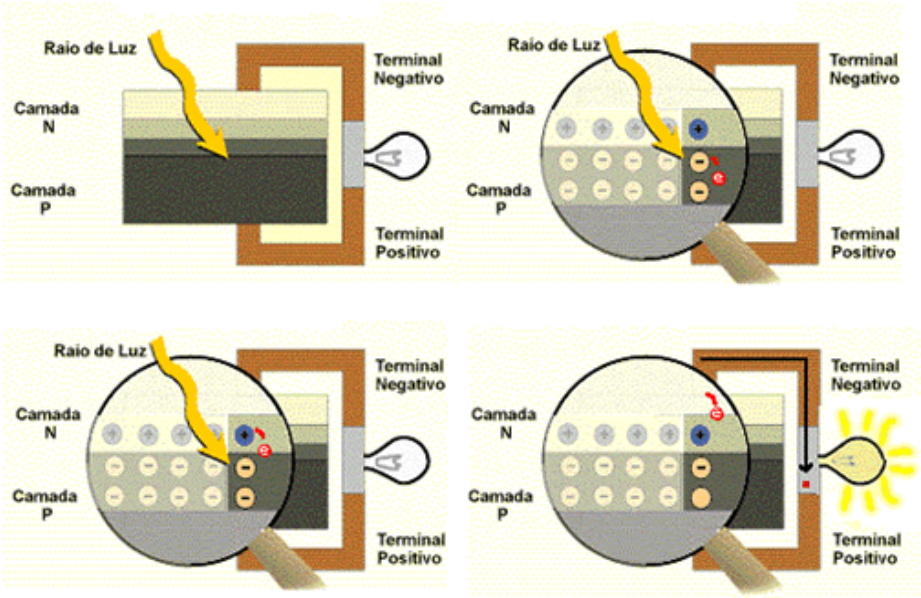


Figura 2.7 - Efeito fotovoltaico na junção P-N – Conversão da radiação solar em electricidade [17]

Nos materiais semicondutores à temperatura de zero Kelvin, todos os electrões se encontram na banda de valência. Assim, o semicondutor tem características de isolante, ou seja, não conduz electricidade. Com o aumento da temperatura os electrões absorvem energia, o que provoca que os mesmos passem da banda de valência para a banda de condução. A energia necessária para que o electrão efectue essa transição é chamada de *gap*. No caso do cristal de silício é de 1,12eV [18].

A luz, constituída por fotões, no momento em que incide sobre uma junção P-N com energia superior à do *gap*, vai provocar que os electrões saltem da banda de valência para a banda de condução, tornando-se electrões livres, que vão aparecer na zona abrangida pelo campo eléctrico da junção. A zona do tipo N vai atrair electrões livres, uma vez que, esta zona se encontra

com uma baixa concentração de cargas negativas, aparecendo desta forma lacunas, que depois serão ocupadas por outros electrões dando assim origem a pares de electrão-lacuna na zona do tipo P. Se este fenómeno acontecer na região onde o campo eléctrico é diferente de zero, as cargas são aceleradas, gerando assim uma corrente através da junção P-N. Este deslocamento de cargas dá origem a uma ddp ao qual se chamou Efeito Fotovoltaico.

Utilizando um condutor externo, liga-se a camada positiva à camada negativa do Silício e forma-se uma corrente eléctrica, correspondente ao fluxo de electrões na ligação [19]. Este é o princípio de funcionamento das células fotovoltaicas.

A Figura 2.8 ilustra a constituição interna de uma célula fotovoltaica.

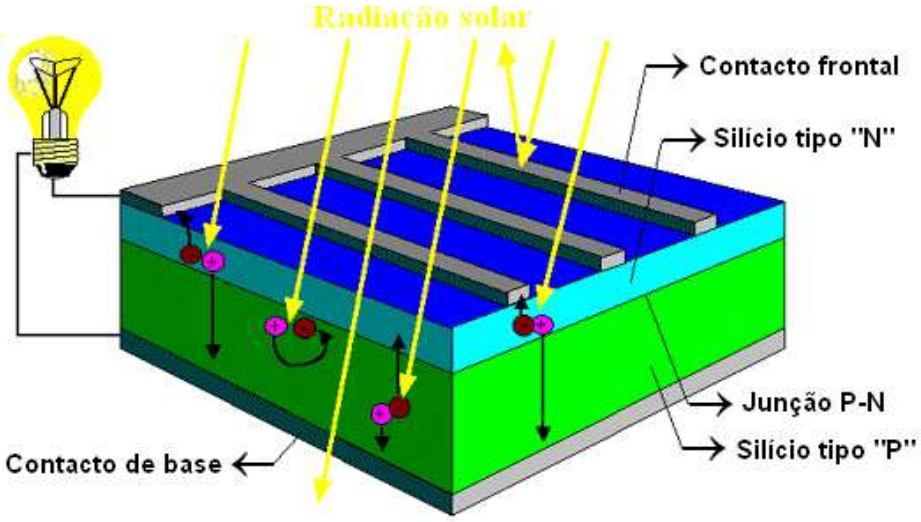


Figura 2.8 - Constituição interna de uma célula fotovoltaica

2.3.1. Tipos de Células Fotovoltaicas

Como referido anteriormente, as células fotovoltaicas são fabricadas, na sua grande maioria, utilizando o silício (Si). Estas podem ser constituídas de cristais monocristalinos, policristalinos ou de silício amorfo.

- Silício Monocristalino (c-Si)

O silício monocristalino é historicamente o material mais utilizado na composição das células fotovoltaicas, sendo as mais comercializadas, atingindo cerca de 60% do mercado. A uniformidade da estrutura molecular resultante da utilização de um único cristal é ideal para potenciar o efeito fotovoltaico. De todas as células fotovoltaicas que utilizam o silício como

material base, as monocristalinas são, em geral, as que apresentam as maiores eficiências. O rendimento máximo atingido por este tipo de células em laboratório ronda os 24%, com uma redução para os 15% na utilização prática [18].

O fabrico da célula de silício começa com a extracção do cristal de dióxido de silício. Este material é desoxidado em grandes fornos, purificado e solidificado. O grau de pureza da desoxidação atinge valores de 98% e 99%, o que do ponto de vista energético é razoavelmente produtivo.

O silício monocristalino para funcionar como célula fotovoltaica necessita de outros dispositivos semicondutores e de um grau de pureza elevado devendo chegar muito perto do 100%.

O processo de fabrico das células fotovoltaicas de silício monocristalino (Figura 2.9 (a)) é complexo e de alto custo. É necessária uma grande quantidade de energia no fabrico, em razão da exigência de utilizar materiais em estado muito puro e com uma estrutura de cristal perfeita.

- Silício Policristalino (p-Si)

O silício policristalino, constituído por um número elevado de pequenos cristais, dispõe de uma quota de mercado de cerca de 30% [18].

As células de silício policristalino (Figura 2.9 (b)) são mais baratas que as de silício monocristalino pela necessidade de um processo de preparação das células, embora semelhante, menos rigoroso. Contudo, a eficiência, baixa um pouco em comparação com as células de silício monocristalino. Os rendimentos em laboratórios não excedem os 18% e em utilização prática os 12% [18]. A estrutura molecular apresenta algumas descontinuidades o que dificulta o movimento dos electrões. Este fenómeno reduz a potência de saída.

- Silício Amorfo (a-Si)

As células de silício amorfo (Figura 2.9 (c)) em relação às estruturas cristalinas são diferentes por manifestar alto grau de desordem na estrutura dos átomos. Estes defeitos estruturais, em princípio, impediriam a sua utilização em células fotovoltaicas, contudo, se ao silício amorfo for adicionado uma pequena quantidade de hidrogénio, por um processo designado hidrogenização, obtém-se uma combinação química dos diferentes átomos para dessa forma minimizar os efeitos negativos dos defeitos estruturais.

O silício amorfo apresenta uma absorção da radiação solar mais produtiva que o silício cristalino, podendo ser fabricado mediante a deposição de variados substratos (metal, vidro, plásticos). Este processo tem-se mostrado uma forte tecnologia para sistemas fotovoltaicos de baixo custo, havendo a possibilidade de fabricar células com grandes áreas.

Apesar do custo reduzido na produção, o uso de silício amorfo apresenta algumas desvantagens em relação às estruturas cristalinas. A baixa eficiência de conversão é a mais preocupante, em laboratório é possível obter rendimentos a rondar os 13%, mas as células são afectadas por um processo de degradação nos primeiros meses de operação, reduzindo a eficiência ao longo da vida útil, pelo que os rendimentos em prática descem para cerca de 6%.

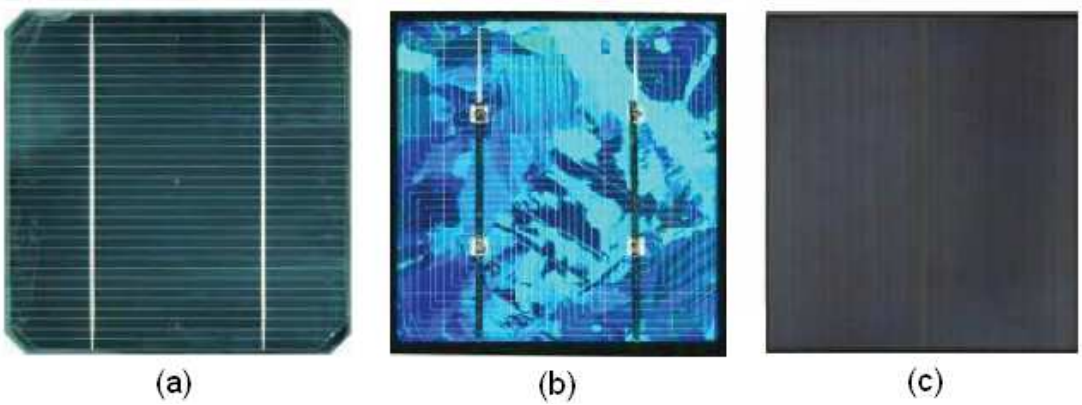


Figura 2.9 - Tipos de células fotovoltaicas: (a) Célula de silício monocristalino; (b) Célula de silício policristalino; (c) Célula de silício amorfo

2.3.2. Modelo Eléctrico de uma Célula Fotovoltaica

A utilização de circuitos eléctricos equivalentes torna possível modelar as características de uma célula fotovoltaica. O método utilizado é elaborado em MATLAB para a simulação. A mesma técnica é igualmente aplicada para estruturar módulos fotovoltaicos.

2.3.2.1. Modelo Simplificado

Quando a luz incide sobre uma célula solar, gerando o efeito fotovoltaico, o modelo mais simples de uma célula fotovoltaica é mostrado no circuito equivalente da Figura 2.10, que consiste numa fonte de corrente ideal em paralelo com um díodo ideal [20]. A fonte de corrente I_{sc} representa a corrente

eléctrica gerada pelo feixe de radiação luminosa, constituída por fotões. Esta corrente unidireccional é constante para uma dada radiação solar incidente [21]. A corrente I_d representa a troca de electrões na junção P-N que pode ser representada por um díodo, pois é uma corrente interna unidireccional, que depende da tensão V aos terminais da célula [22].

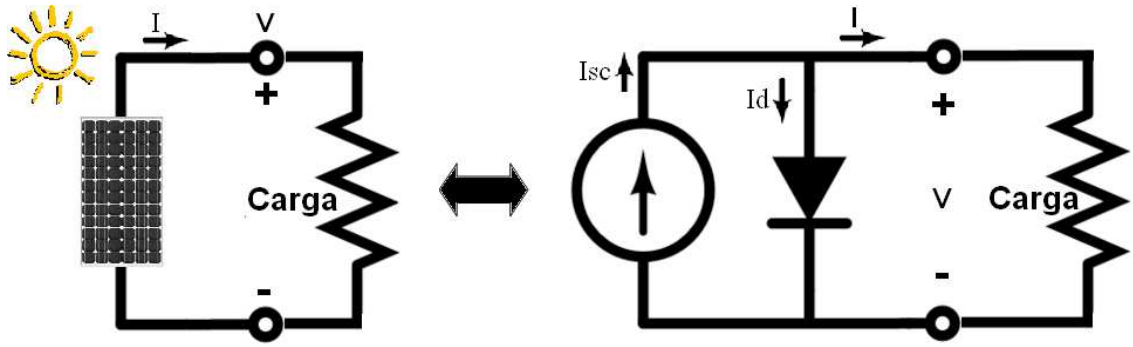


Figura 2.10 - Modelo simplificado do circuito equivalente de uma célula fotovoltaica

Frequentemente existem dois parâmetros principais que caracterizam as células fotovoltaicas. Curto-circuitando os terminais da célula fotovoltaica, como se verifica na Figura 2.11 (a), a corrente fotoeléctrica gerada sairá fora das células como corrente de curto-circuito (I_{sc}). Assim, $I=I_{sc}$. Como mostra a Figura 2.11 (b), onde não há ligação para a célula fotovoltaica (circuito aberto), a corrente gerada é curto-circuitada internamente pelo díodo de junção P-N que está intrínseca ao circuito. Isto fornece a tensão de circuito aberto (V_{oc}), que é o valor máximo aos terminais da célula. O módulo fotovoltaico ou as células produzidas normalmente fornecem o valor destes parâmetros nos *datasheets*.

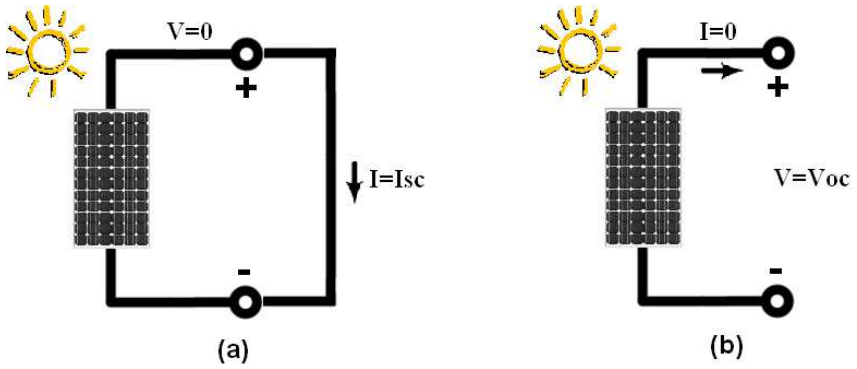


Figura 2.11 - Modelos ilustrando os dois principais parâmetros que caracterizam as células fotovoltaicas: (a) Isc - corrente curto-circuito; (b) Voc - tensão de circuito aberto

Aplicando as leis de Kirchoff ao circuito da Figura 2.10 obtém-se a corrente de saída I a partir da célula fotovoltaica.

$$I = Isc - Id \tag{2.1}$$

Onde: I_{sc} representa a corrente de curto-circuito, igual à corrente gerada pelo feixe luminoso, e I_d a corrente que atravessa o díodo.

A corrente I_d é dada pela equação de díodo ideal de Shockley, equação (2.2).

$$Id = Io\ (e^{q\,Vd/k\,T} - 1) \tag{2.2}$$

Onde: I_o é a corrente de saturação inversa do díodo (A),
q é a carga de um electrão ($1{,}602 \times 10^{-9}$ C),
V_d é a tensão aos terminais do díodo (V),
k é a constante de Boltzmann ($1{,}381 \times 10^{-23}$ J/K),
T é a temperatura da célula (K).

Substituindo I_d da equação (2.1) pela equação (2.2) obtém-se a equação (2.3) que fornece a relação corrente-tensão da célula fotovoltaica.

$$I = Isc - Io\ (e^{q\,V/k\,T} - 1) \tag{2.3}$$

Onde: I é a corrente de saída da célula fotovoltaica, e V a tensão aos terminais da célula.

A corrente de saturação inversa do díodo (I_o) é constante sob temperatura constante, e calcula-se definindo a condição de circuito aberto como ilustra a Figura 2.11 (b). Utilizando a equação (2.3), com I=0, determina-se a equação que permite calcular I_o.

$$0 = Isc - Io\ (e^{q\,Voc/k\,T} - 1) \tag{2.4}$$

$$Isc = Io\ (e^{q\,Voc/k\,T} - 1) \tag{2.5}$$

$$Io = \frac{Isc}{(e^{q\,Voc/k\,T} - 1)} \tag{2.6}$$

Esta é uma aproximação muito boa da corrente gerada nas condições de circuito aberto, que é igual a I_{sc}, e directamente proporcional à radiação solar incidente. Como o valor de I_{sc} é conhecido nos *datasheets* dos fabricantes das células ou módulos fotovoltaicos sob condições nominais de teste, normalizadas para a realização das medidas dos parâmetros característicos da célula, designadas condições de referência que são à temperatura de 25ºC e radiação solar incidente com valor de Go=1000W/m^2. Deste modo a corrente gerada com outra radiação é dada pela equação (2.7).

$$Isc\,|_G = \left(\frac{G}{Go}\right) Isc\,|_{Go} \tag{2.7}$$

A Figura 2.12 apresenta a relação da corrente e tensão, denominada de curva I-V, de uma célula fotovoltaica ideal simulada no MATLAB utilizando o modelo mais simplificado do circuito equivalente. Também se pode constatar pela Figura 2.12 que a corrente na célula é proporcional à radiação solar incidente sobre ela.

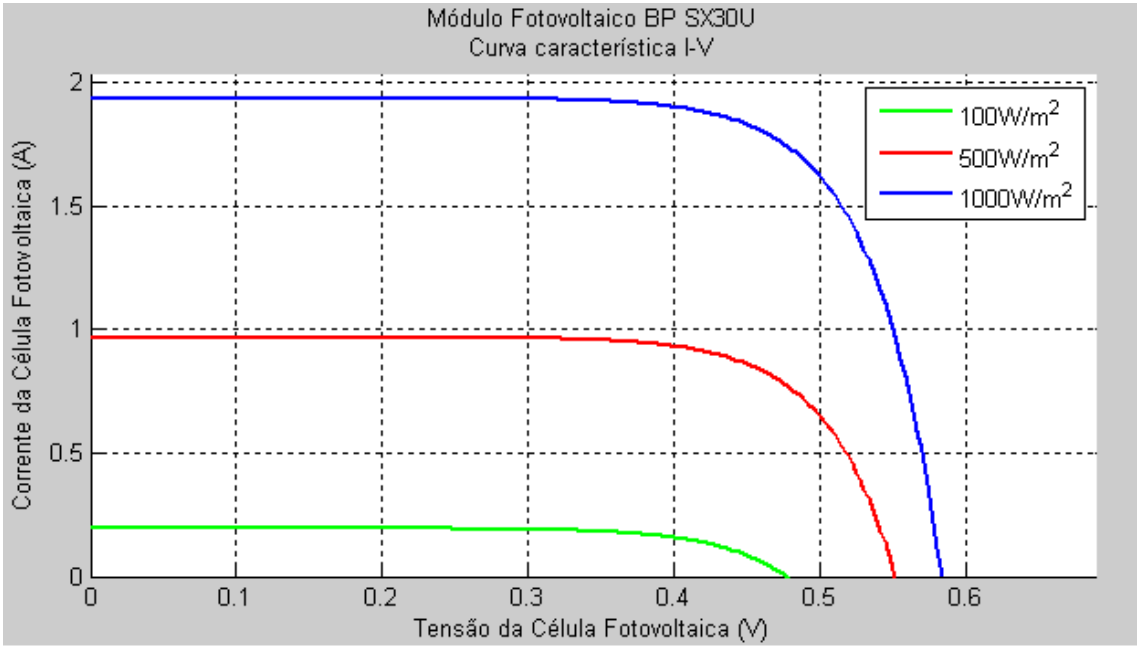


Figura 2.12 - Curva I-V da célula fotovoltaica sob 3 níveis diferentes de radiação solar a temperatura constante de 25ºC

2.3.2.2. Modelo Aperfeiçoado

No modelo simplificado existem alguns parâmetros que não são tomados em consideração, e que na prática afectam o desempenho de uma célula fotovoltaica. Apresenta-se outro modelo, Figura 2.13, denominado por modelo de dois díodos, num aperfeiçoamento do modelo simples das células fotovoltaicas. As células reais apresentam perdas, facto que não é considerado no modelo simplificado. Algumas dessas perdas são representadas através de resistências inseridas neste modelo eléctrico equivalente. Na prática, numa célula fotovoltaica existem uma série de resistências no caminho da corrente através do material semicondutor. A resistência série (Rs) representa a resistência dos contactos metálicos entre as células e entre o painel e a carga [23]. O efeito desta resistência é tanto maior quanto o número de células ligadas em série num módulo fotovoltaico. A resistência em paralelo (Rp) traduz a resistência dos cristais da junção P-N que constitui a célula, ou seja, esta resistência descreve as perdas que surgem principalmente através das perturbações eléctricas entre as diferentes partes da célula. O efeito desta resistência é de menor evidência num módulo fotovoltaico em comparação com a resistência em série Rs. Contudo, é de elevada importância quando vários módulos são ligados em paralelo para um sistema fotovoltaico mais amplo.

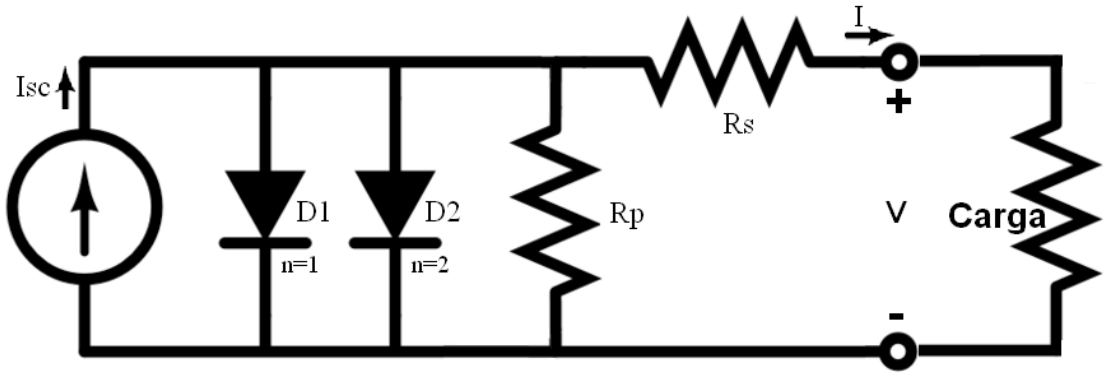


Figura 2.13 - Modelo de dois díodos do circuito equivalente de uma célula fotovoltaica

Resumindo os efeitos dos componentes eléctricos adicionados neste modelo de circuito equivalente da célula fotovoltaica, e aplicando as leis de Kirchoff ao mesmo (Figura 2.13) encontra-se a equação (2.8).

$$I = Isc - Io_1\left[e^{q\frac{V+I\,Rs}{kT}} - 1\right] - Io_2\left[e^{q\frac{V+I\,Rs}{2kT}} - 1\right] - \left(\frac{V + I\,Rs}{Rp}\right) \quad (2.8)$$

É possível reescrever a equação (2.8) de forma mais simplificada combinando D_1 e D_2. A equação (2.9) resulta da igualdade dessa simplificação.

$$I = Isc - Io\left[e^{\left(q\frac{V+I\,Rs}{nkT}\right)} - 1\right] - \left(\frac{V + I\,Rs}{Rp}\right) \quad (2.9)$$

Onde: n é o factor de idealidade do díodo e tem um valor compreendido entre 1 e 2 (díodo ideal: n=1; díodo real: n> 1) [24].

2.4. Módulos Fotovoltaicos

Uma célula fotovoltaica, isoladamente, tem capacidade reduzida de produção de energia eléctrica, tipicamente entre 1W e 2W, correspondente a uma tensão de saída inferior a 1V, cerca de 0,6V para as células de silício cristalino (Si) [25]. Assim, para se conseguir os níveis de tensão e corrente desejados é necessário fazer associações de várias células, através de ligações série e paralelo, formando deste modo os módulos fotovoltaicos.

A maior parte dos módulos fotovoltaicos disponíveis comercialmente são compostos por 36 ou 72 células de silício cristalino ligadas em série. Um módulo com 36 células fornece uma tensão adequada para carregar uma bateria com tensão nominal de 12V e, um módulo de 72 células é apropriado para uma bateria de 24V.

As especificações dos principais parâmetros dos módulos fotovoltaicos são fornecidas pelos fabricantes, considerando para isso condições referência com as quais se devem realizar os testes dos painéis (STC – *Standard Test Conditions*), que são 1000W/m^2 de radiação solar incidente, com um efeito de absorção pelo ar de 1,5 (AM 1,5) e temperatura das células de 25ºC. Estes parâmetros são:

- **Potência máxima (P_{max}):** representa a potência nominal do painel fotovoltaico.

- **Ponto de máxima potência (MPP):** o produto da corrente com a tensão em cada ponto da curva I-V representa a potência gerada para uma dada condição de operação. Num módulo fotovoltaico só existe um ponto na curva onde a potência máxima é alcançada. Este ponto é designado por MPP.
- **Tensão no ponto de máxima potência (V_{mp}):** corresponde à tensão no ponto de máxima potência.
- **Corrente no ponto de máxima potência (I_{mp}):** corresponde à intensidade da corrente no ponto de máxima potência.
- **Corrente de curto-circuito (I_{sc}):** é o valor máximo de intensidade de corrente que atravessa a carga.
- **Tensão de circuito aberto (V_{oc}):** é o valor máximo da tensão nos terminais do módulo fotovoltaico, quando nenhuma carga está ligada a ele.
- **Factor de forma (FF):** é a relação entre a máxima potência que o módulo fotovoltaico realmente pode fornecer e o produto de I_{sc} com V_{oc}. Com esta característica tem-se uma ideia da qualidade do painel. Quanto mais próximo de 1 for o valor de FF, mais potência o painel pode fornecer. Valores típicos de FF variam entre 0,7 e 0,8.
- **Temperatura normal de operação (NOCT):** representa a temperatura normal de operação da célula (*normal operating cell temperature*), medida com 800W/m^2 de radiação solar incidente, temperatura ambiente de 20ºC e com uma velocidade do vento de 1m/s.

O funcionamento de um módulo fotovoltaico pode ser compreendido analisando a curva que relaciona a tensão com a corrente à saída do mesmo. Esta curva é designada como característica I-V e apresenta o mesmo formato geral para qualquer painel fotovoltaico. A Figura 2.14 ilustra uma curva I-V de um painel genérico.

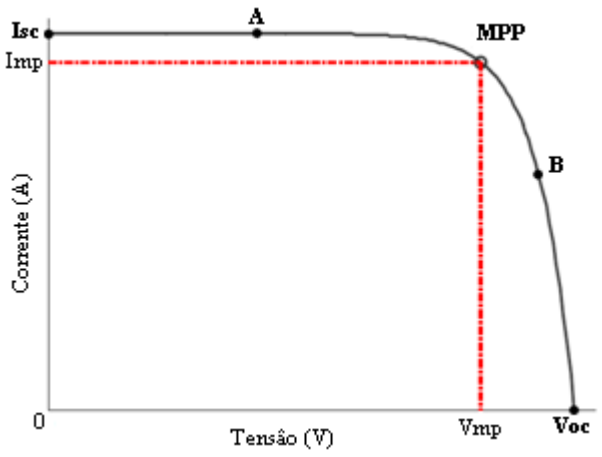


Figura 2.14 - Curva característica I-V de um painel genérico

Como se verifica através da Figura 2.14, a curva I-V de um módulo fotovoltaico apresenta uma característica não linear. Se o funcionamento do painel for mantido dentro da região entre I_{sc} e o ponto A, o painel será considerado uma fonte de corrente constante [23], de valor igual à corrente de curto-circuito I_{sc} representada na figura. Por outro lado, para um funcionamento na região entre o ponto B e V_{oc} o painel terá um comportamento idêntico a uma fonte de tensão constante [23], de valor igual à tensão de circuito aberto V_{oc}. O ponto em que o módulo fotovoltaico funciona na potência máxima encontra-se entre as duas zonas referidas, e está representado na Figura 2.14 como MPP, com ponto de coordenadas I_{mp} e V_{mp}. Este é o ponto de funcionamento óptimo, então é importante que o sistema fotovoltaico se mantenha nesta zona de funcionamento.

2.5. Modelo do Módulo Fotovoltaico BP SX30U no MATLAB

O módulo fotovoltaico BP SX30U, ilustrado na Figura 2.15, foi o painel fotovoltaico escolhido para o modelo de simulação. Os modelos foram matematicamente modelados e implementados no MATLAB para o estudo das características I-V do módulo fotovoltaico para as condições ambientais que influenciam o funcionamento do mesmo, concretamente a temperatura e a radiação solar incidente.

O módulo é composto por 36 células de silício policristalino ligadas em série e fornece 30W de potência máxima nominal [26]. A Tabela 2.1 mostra as especificações eléctricas do módulo fotovoltaico BP SX 30U, ilustrado na Figura 2.15.

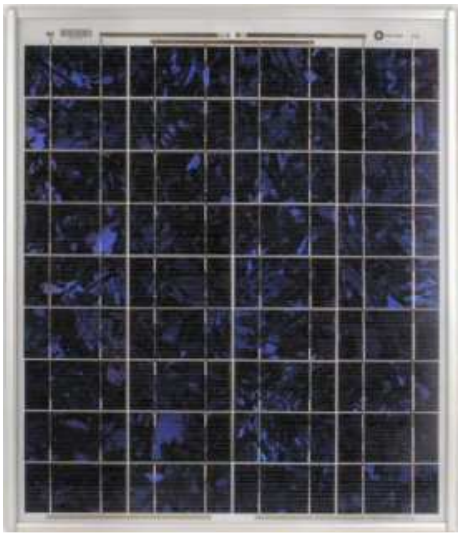


Figura 2.15 - Módulo fotovoltaico BP SX30U

Tabela 2.1 - Características eléctricas do módulo fotovoltaico BP SX 30U [26]

Características eléctricas do módulo fotovoltaico BP SX 30U	
Potência máxima (P_{max})	30 W
Tensão no ponto de máxima potência (V_{mp})	16,8 V
Corrente no ponto de máxima potência (I_{mp})	1,78 A
Corrente de curto-circuito (I_{sc})	1,94 A
Tensão de circuito aberto (V_{oc})	21 V
Coeficiente de temperatura de I_{sc}	(0,065 ± 0,015) %/K
Coeficiente de temperatura de V_{oc}	- (80 ± 10) mV/K
Coeficiente de temperatura da potência	- (0,5 ± 0,05) %/K
NOCT	47 ± 2 ºC

A estratégia para modelar um módulo fotovoltaico não é diferente da modelação de uma célula fotovoltaica. Os circuitos equivalentes utilizados para a simulação são os mesmos, os parâmetros das características eléctricas são os fornecidos no *datasheet* do fabricante, apenas a tensão de circuito aberto (V_{oc}) é diferente, e o seu valor deve ser dividido pelo número de células que compõem o módulo.

O circuito eléctrico equivalente utilizado para modelar o painel fotovoltaico difere um pouco dos anteriormente analisados e foi usado em [27]. Este circuito, ilustrado na Figura 2.16, é menos complexo e garante resultados bastante precisos. Consiste numa fonte de corrente (I_{sc}), um díodo (D) e uma resistência série (Rs). Uma resistência em paralelo (Rp) não é considerada neste circuito, como no modelo aperfeiçoado de uma célula fotovoltaica, porque se está a considerar apenas um painel fotovoltaico e o seu efeito nestas circunstâncias é bastante reduzido.

Apesar de neste modelo se aplicar apenas um díodo (D), utilizou-se também um factor de idealidade do díodo (n) para que desta forma se consiga incluir o efeito da temperatura sobre a corrente de curto-circuito (I_{sc}) e a corrente de saturação inversa do díodo (I_o). Assim alcança-se maior precisão nas características I-V do painel fotovoltaico.

Para a simulação foi criado um ficheiro *.m,* do MATLAB, que implementa a função *bp_sx30M*. Esta função recebe como parâmetros a intensidade da radiação solar incidente em W/m^2, a temperatura da célula fotovoltaica em ºC e o vector das tensões de saída (V_a). O vector das tensões de saída tem como

objectivo simular uma carga, fazendo dessa forma com que a curva característica I-V percorra todos os pontos de interesse para uma implementação próxima da realidade.

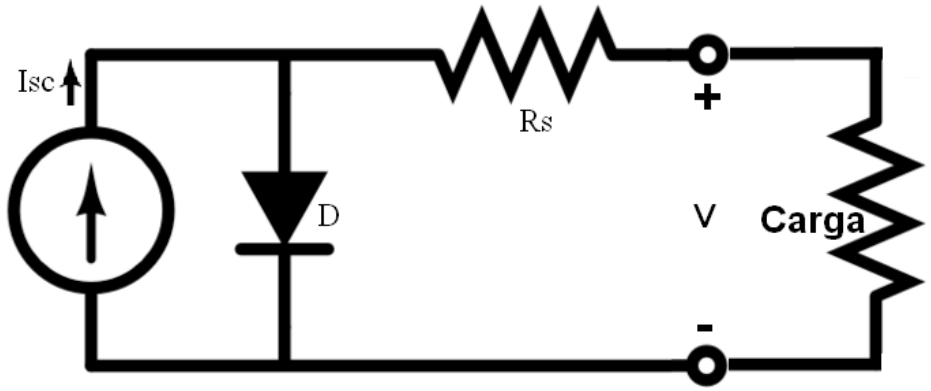


Figura 2.16 - Circuito equivalente utilizado para a simulação do módulo fotovoltaico BP SX30U

Como neste modelo não se inclui o efeito da resistência em paralelo (Rp), sendo Rp = ∞ na equação (2.9), obtém-se a equação (2.10) que descreve a relação da corrente e tensão da célula fotovoltaica.

$$I = Isc - Io\left[e^{q\left(\frac{V+I\,Rs}{nkT}\right)} - 1\right] \tag{2.10}$$

Onde: I é a corrente de saída da célula (A),

V é a tensão aos terminais da célula (V) = Tensão no módulo/Nº células em série do módulo,

T é a temperatura da célula (K).

Em primeiro lugar, calcula-se a corrente de curto-circuito (I_{sc}) a uma determinada temperatura da célula fotovoltaica de acordo com a equação (2.11)[27].

$$Isc|_T = Isc\,|_{Tref}\,[1 + a\,(T - Tref)] \tag{2.11}$$

Onde: I_{sc} à T_{ref} é fornecida no *datasheet*, medida com uma radiação solar incidente de 1000W/m^2,

T_{ref} é a temperatura referência da célula fotovoltaica em *Kelvin* (K), habitualmente 298K (25ºC),

a é o coeficiente de temperatura de *Isc* (%/K).

A corrente de curto-circuito (I_{sc}) é proporcional à intensidade da radiação solar, por isso, I_{sc} a uma determinada radiação solar (G) é dada na equação (2.12).

$$Isc|_G = \left(\frac{G}{Go}\right) Isc|_{Go} \tag{2.12}$$

Onde: G_0 é o valor nominal da radiação solar incidente sobre uma célula fotovoltaica, normalmente 1000 W/m^2.

A corrente de saturação inversa do díodo (I_o) à temperatura referência (T_{ref}) é dada pela equação (2.6), mas como é considerado o factor de idealidade do díodo (n), I_o calcula-se com base na equação (2.13).

$$Io = \frac{Isc}{\left(e^{\frac{q\,Voc}{nkT}} - 1\right)} \tag{2.13}$$

A corrente de saturação inversa do díodo (I_o) é dependente da temperatura e pode calcular-se em função da mesma através da equação (2.14) [27].

$$Io\,|_T = Io\,|_{Tref} \left(\frac{T}{Tref}\right)^{\frac{3}{n}} e^{\frac{-q\,Eg}{nk}\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{Tref}\right)} \tag{2.14}$$

O efeito da resistência série (Rs) do módulo fotovoltaico tem um grande impacto na inclinação da curva característica I-V perto da tensão de circuito aberto. Assim, o valor de Rs é calculado mediante a avaliação do declive $\frac{dV}{dI}$ da curva I-V no ponto da tensão de circuito aberto (V_{oc}). A equação para calcular Rs é a derivada em função da corrente da equação (2.10), e em seguida reorganizando-a em ordem a Rs. Deste modo as equações (2.15), (2.16), (2.17) e (2.18) efectuam os cálculos para a situação descrita.

$$I = Isc - Io\left[e^{q\left(\frac{V+I\,Rs}{nkT}\right)} - 1\right] \tag{2.15}$$

$$dI = 0 - Io\,q\left(\frac{dV + Rs\,dI}{nkT}\right) e^{q\left(\frac{V+I\,Rs}{nkT}\right)} \tag{2.16}$$

Reescrevendo a equação (2.16) em ordem a Rs, obtém-se a equação (2.17).

$$Rs = -\frac{dI}{dV} - \frac{\frac{nkT}{q}}{Io\,e^{q\left(\frac{V+I\,Rs}{nkT}\right)}} \tag{2.17}$$

Seguidamente, analisar a equação (2.17) na situação de circuito aberto, ou seja, V=V_{oc} e I=0. Assim, encontra-se a equação (2.18).

$$Rs = -\frac{dV}{dI}\Big|_{Voc} - \frac{\frac{nkT}{q}}{Io\,e^{\left(\frac{q\,Voc}{nkT}\right)}} \tag{2.18}$$

Onde: $-\frac{dV}{dI}|_{Voc}$ é a inclinação da curva característica I-V no ponto V_{oc}.

V_{oc} é a tensão de circuito aberto da célula, obtida através da divisão do valor de V_{oc} fornecido no *datasheet* do fabricante pelo número de células que compõe o painel.

Finalmente, é possível determinar a equação que caracteriza a curva I-V do módulo fotovoltaico. Contudo, pela inclusão da resistência série (Rs) no modelo torna-se bastante complexa, pois a solução é recursiva, ou seja, uma função que se pode invocar a si própria. A solução pode ser encontrada por iterações simples, no entanto, o método de Newton é considerado por muitos autores um processo de convergência frequentemente rápido. Em notação matemática o método de Newton é descrito pela equação (2.19).

$$x_{n+1} = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)} \tag{2.19}$$

Onde: x_{n+1} é o valor da iteração seguinte, x_n é o valor da presente iteração e $f'(x_n)$ é a derivada da função x_n.

Reescrevendo a equação (2.10), para em seguida se aplicar o método de Newton, surge a equação (2.20).

$$f(I) = Isc - I - Io\left[e^{q\left(\frac{V+I\,Rs}{nkT}\right)} - 1\right] = 0 \tag{2.20}$$

Com base no método de Newton, que fornece equações recursivas e reescrevendo a equação (2.20) encontra-se finalmente a equação (2.21) que caracteriza a curva I-V do módulo fotovoltaico.

$$I_{n+1} = I_n - \frac{Isc - I - Io\left[e^{q\left(\frac{V+I_n\,Rs}{nkT}\right)} - 1\right]}{-1 - Io\left(\frac{q\,Rs}{nkT}\right)e^{q\left(\frac{V+I_n\,Rs}{nkT}\right)}} \tag{2.21}$$

2.5.1. Curva Característica I-V e Ponto de Máxima Potência

Depois de analisado e simulado no MATLAB o modelo matemático com base no circuito eléctrico equivalente da Figura 2.16, chega-se à curva da corrente em função da tensão (curva característica I-V) do painel fotovoltaico BP SX30U a uma dada temperatura e intensidade da radiação solar incidente, como mostra a Figura 2.17. Para cada ponto da curva característica I-V o produto da corrente com a tensão representa a potência gerada para aquela condição de operação. Nas condições de curto-circuito e de circuito aberto não há potência gerada pelo módulo fotovoltaico, pois a corrente ou a tensão são zero, respectivamente.

Existe um único ponto na curva característica I-V no qual o módulo opera com a máxima eficiência e produz a potência máxima. Esse ponto é chamado de ponto de máxima potência (MPP) e está também ilustrado na Figura 2.17. O ponto de funcionamento máximo ocorre quando os valores da tensão e da corrente são máximos, o que nas condições referência implica que $V=V_{mp}$ e $I=I_{mp}$.

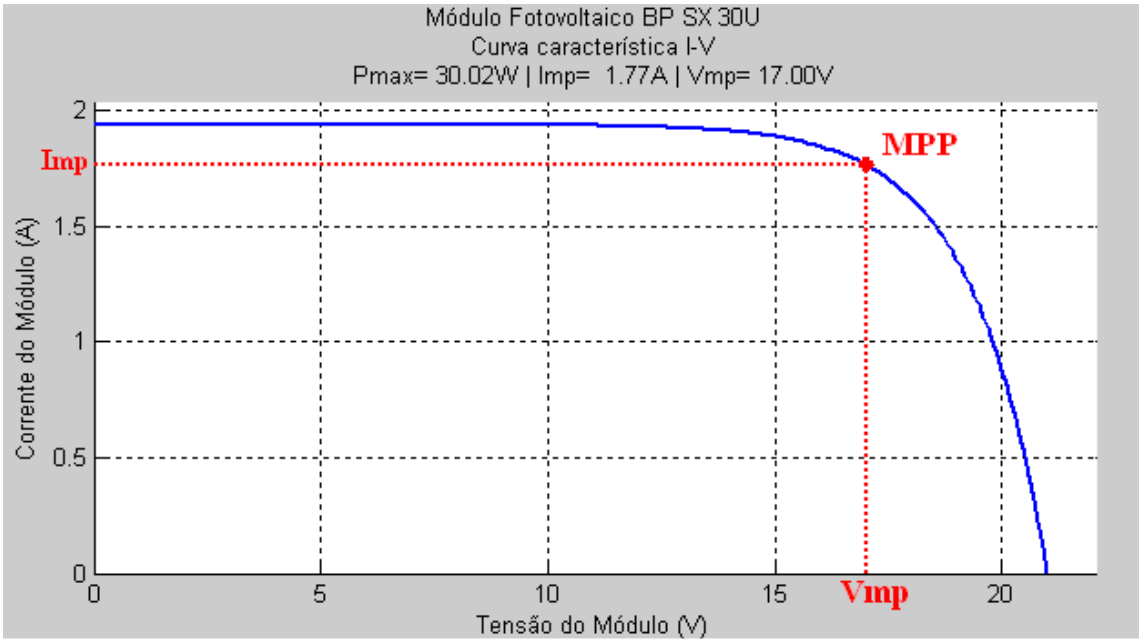


Figura 2.17 – Simulação no MATLAB da curva caracteristica I-V e respectivo MPP do módulo fotovoltaico BP SX30U (1000 W/m^2 e 25ºC)

Outra curva interessante para analisar o comportamento dos módulos fotovoltaicos é mostrada na Figura 2.18. A curva P-V ilustra a potência do módulo em função da tensão. Tal como a curva característica I-V, também esta revela como é importante um sistema fotovoltaico operar com o módulo no ponto de funcionamento MPP, em virtude de explorar a potência máxima do mesmo. O Capítulo 3 irá discutir como fazê-lo.

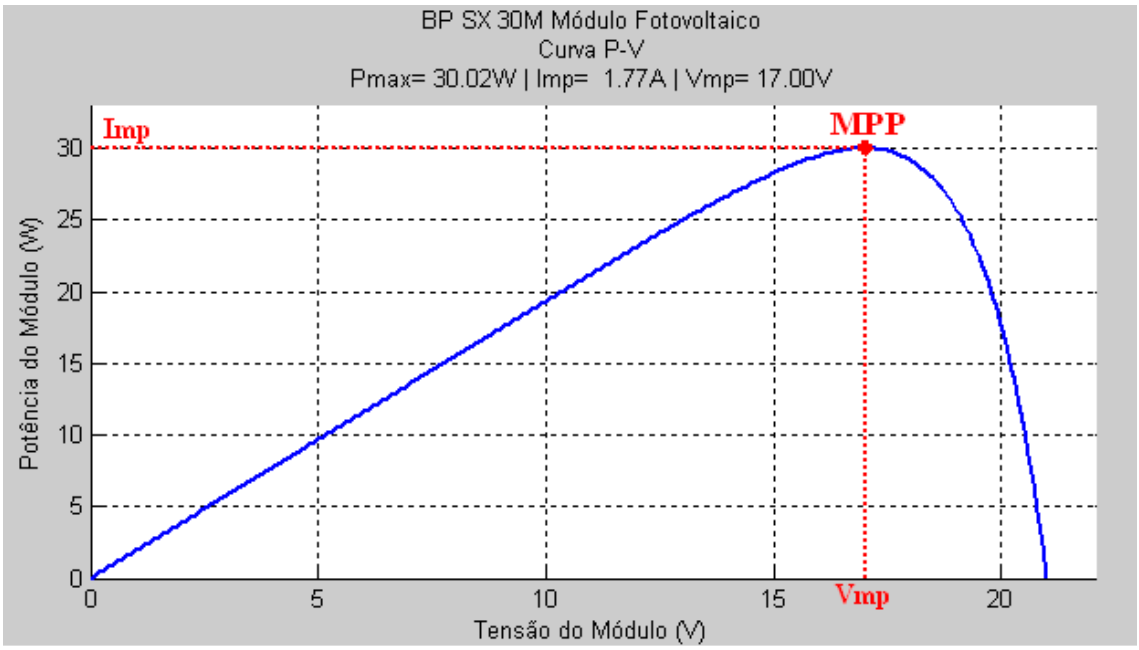


Figura 2.18 – Simulação no MATLAB da curva P-V e respectivo MPP do módulo fotovoltaico BP SX30U (1000 W/m^2 e 25ºC)

Perante as Figura 2.17 e Figura 2.18 que representam as curvas características I-V e PV respectivamente, observa-se que a uma radiação solar incidente de 1000W/m^2 e temperatura constante de 25ºC a potência fornecida pelo painel é de 30,02W, conforme estabelece o fabricante. As curvas I-V e P-V também se aproximam muito das curvas fornecidas pelo fabricante.

2.5.2. Efeitos Meteorológicos nas Características Eléctricas dos Módulos Fotovoltaicos

Existem dois factores climatéricos que influenciam directamente as características eléctricas de uma célula fotovoltaica e, portanto, de um painel fotovoltaico. Esses factores, como já referido anteriormente, são a intensidade da radiação solar incidente e a temperatura das células fotovoltaicas. O modelo matemático modelado anteriormente permite observar o comportamento da corrente, tensão e da potência sob condições de temperatura e radiação solar diferentes das condições padrões de teste (radiação solar incidente de 1000W/m^2 e temperatura da célula de 25ºC). Os resultados apresentados das curvas características I-V em várias condições climáticas foram simulados no MATLAB com base no modelo matemático descrito na secção 2.5 deste capítulo, para o módulo fotovoltaico BP SX30U.

Existem outros factores que influenciam a curva característica I-V. O valor da resistência série (Rs) influencia na inclinação da curva depois do ponto de máxima potência, e o efeito produzido pelo factor de idealidade do díodo também é considerado, para dessa forma se conseguirem resultados mais aproximados da realidade.

2.5.2.1. Efeito Produzido pela Radiação Solar

A corrente gerada pelos painéis fotovoltaicos é directamente dependente da intensidade da radiação solar. Com a variação da radiação solar incidente num painel ocorre uma variação proporcional na corrente fornecida pelo mesmo. A tensão de circuito aberto sofre poucas alterações com a variação da radiação solar, contudo nos casos em que a radiação solar é baixa acontece um deslocamento do ponto de máxima potência para valores mais baixos. A Figura 2.19 ilustra um exemplo de curvas características I-V para várias intensidades de radiação solar a uma temperatura constante de 25ºC, enquanto as curvas P-V para as diversas densidades de potência luminosa e

temperatura 25ºC são mostradas na Figura 2.20.

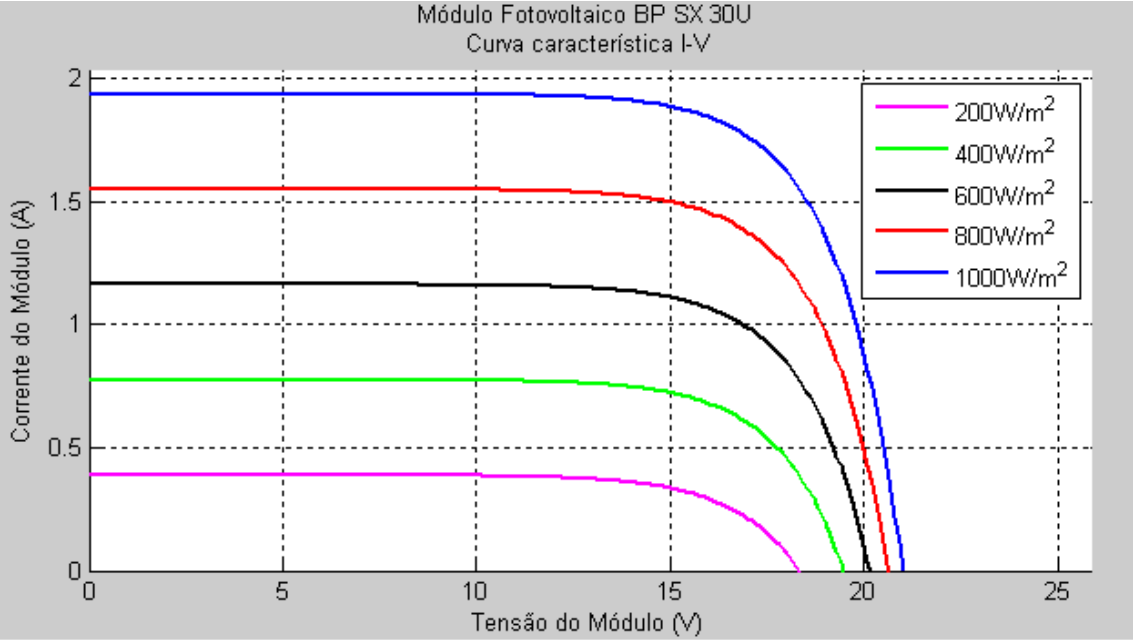


Figura 2.19 – Curvas características I-V para várias intensidades de radiação solar incidente e temperatura do módulo igual a 25ºC

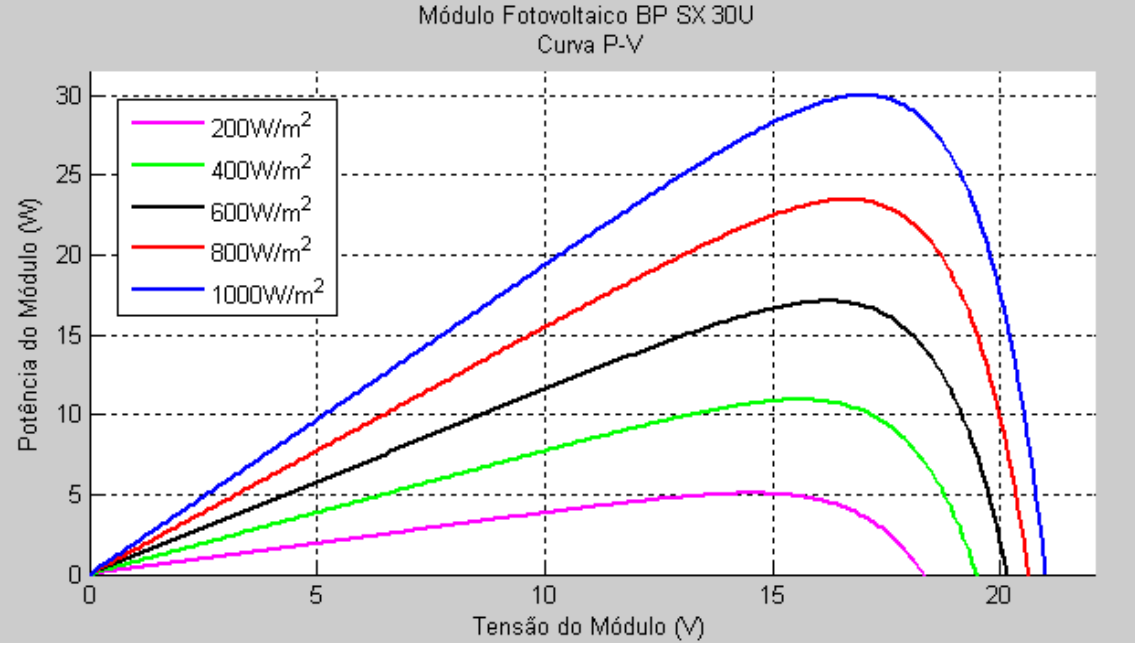


Figura 2.20 – Curvas P-V para várias intensidades de radiação solar incidente e temperatura do módulo a 25ºC

2.5.2.2. Efeito Produzido pela Temperatura das Células

A corrente gerada pelo módulo fotovoltaico apresenta poucas variações com a alteração da temperatura da célula fotovoltaica, ao contrário do que acontece com o efeito produzido pela intensidade da radiação solar incidente. Contudo, a tensão de circuito aberto do módulo fotovoltaico manifesta uma

diminuição do seu valor com o aumento da temperatura. Além de ocorrer um deslocamento do ponto de máxima potência para valores mais baixos, esse ponto também é significativamente deslocado para a esquerda.

A Figura 2.21 mostra um exemplo de curvas características I-V para várias temperaturas do painel fotovoltaico a uma intensidade de radiação solar incidente constante de 1000W/m^2, enquanto as curvas P-V para as diversas temperaturas com 1000W/m^2 de radiação solar constante são mostradas na Figura 2.22.

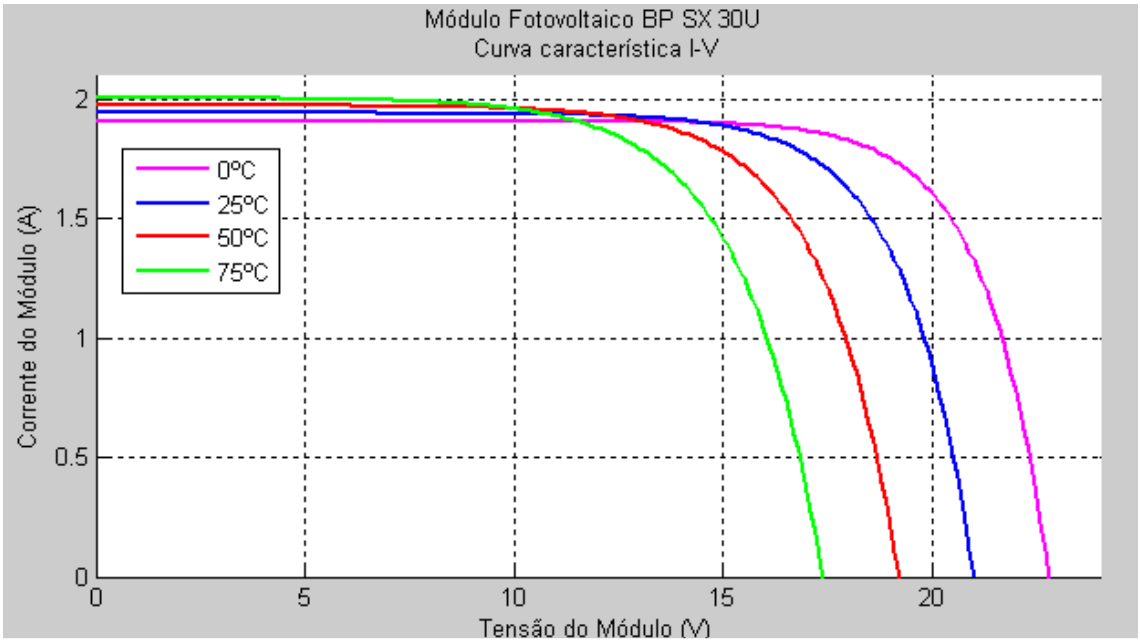


Figura 2.21 - Curvas características I-V para várias temperaturas do módulo e radiação solar incidente de 1000 W/m^2

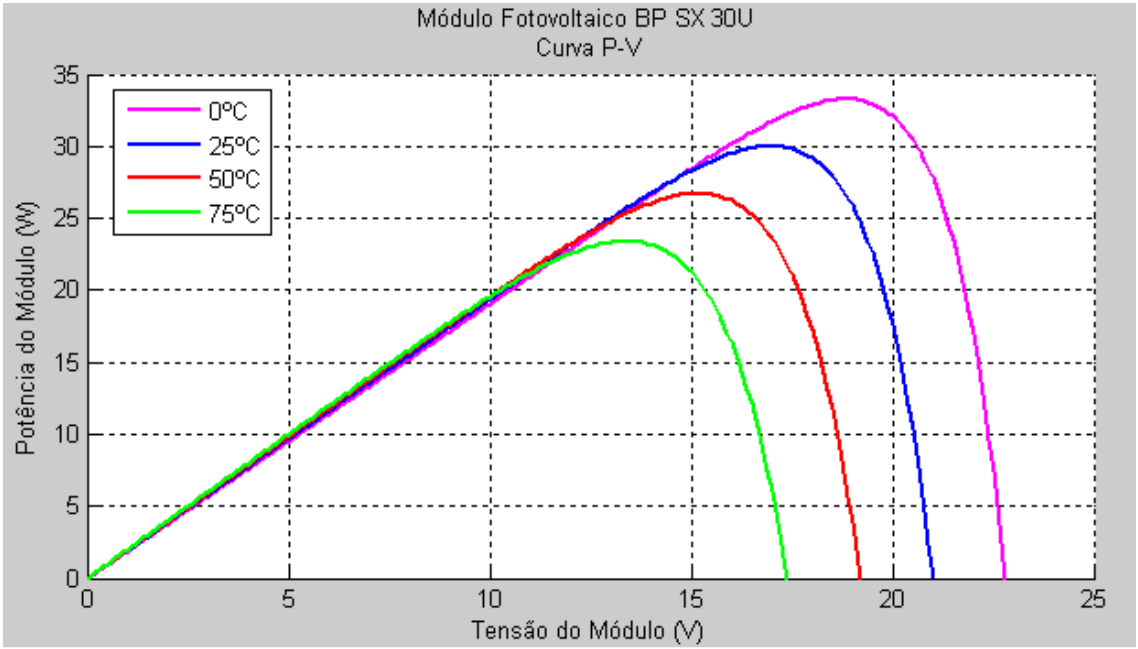


Figura 2.22 - Curvas P-V para várias temperaturas do módulo fotovoltaico e radiação solar incidente de 1000 W/m^2

2.5.2.3. Efeito Produzido pelo Factor de Idealidade do Díodo

O factor de idealidade do díodo é desconhecido e deve ser estimado. O valor deste está compreendido entre 1 e 2 (díodo ideal: n=1; díodo real: n> 1), [24], e constitui um parâmetro de ajuste da curva característica I-V. O valor utilizado nas simulações foi estimado ajustando a curva característica e comparando-a com a mesma fornecida no *datasheet* do fabricante e, os resultados amostrados anteriormente das curvas I-V com a variação da radiação solar incidente e da temperatura têm como valor estimado do factor de idealidade do díodo de 1,8.

A Figura 2.23 mostra o efeito produzido pelo factor de idealidade do díodo na curva característica I-V.

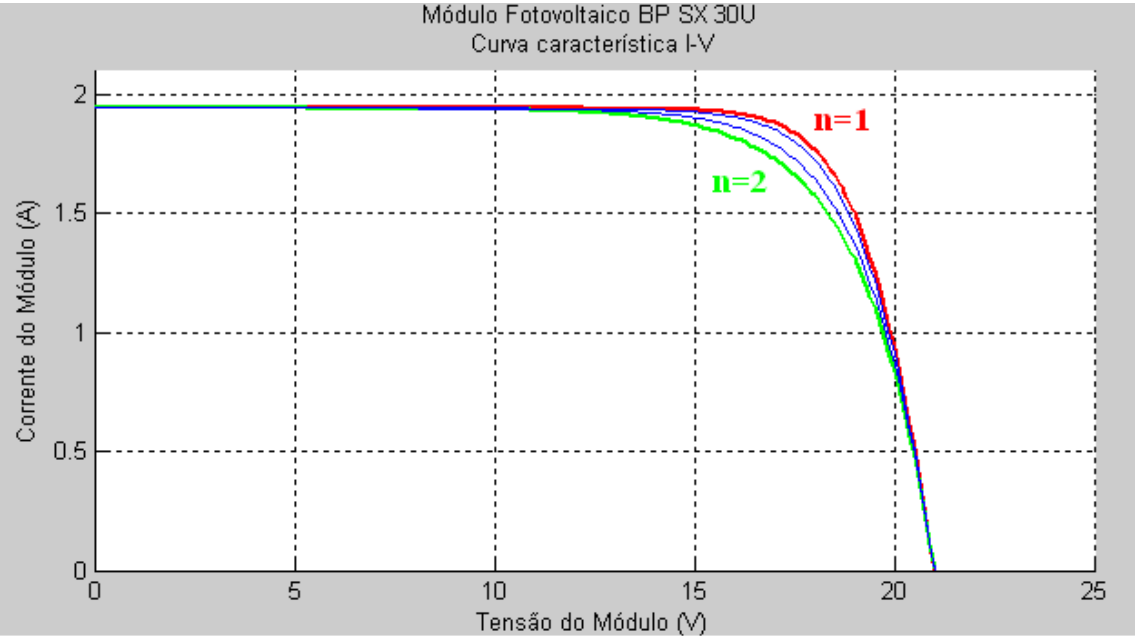


Figura 2.23 – Efeito produzido pelo factor de idealidade do dídodo nas curvas características I-V

2.5.2.4. Efeito Produzido pelas Resistências Intrínsecas dos Módulos Fotovoltaicos

A resistência série (Rs) dos módulos fotovoltaicos tem influência na curva característica I-V, nomeadamente depois do ponto de máxima potência, ou seja, quando o módulo se passa a comportar como fonte de tensão. Assim, esta resistência tem uma intervenção na inclinação da curva I-V perto da tensão de circuito aberto (Voc). O valor da resistência Rs provém da derivada da equação (2.10) em função da corrente gerada, que resulta na equação

(2.18). O cálculo da resistência série do módulo fotovoltaico BP SX30U na simulação em MATLAB resultou num valor de 3,9mΩ por célula. O aumento de Rs provoca o deslocamento do ponto de máxima potência para valores inferiores como se pode verificar na Figura 2.24. Esta figura mostra o efeito produzido pela resistência série da célula fotovoltaica na curva característica I-V. A resistência em paralelo Rp ajusta a inclinação da curva antes do ponto de máxima potência, quando o painel se comporta como fonte de corrente. Como esta resistência não é considerada no modelo equivalente para a simulação não são mostrados resultados para o efeito criado pela mesma na curva característica I-V.

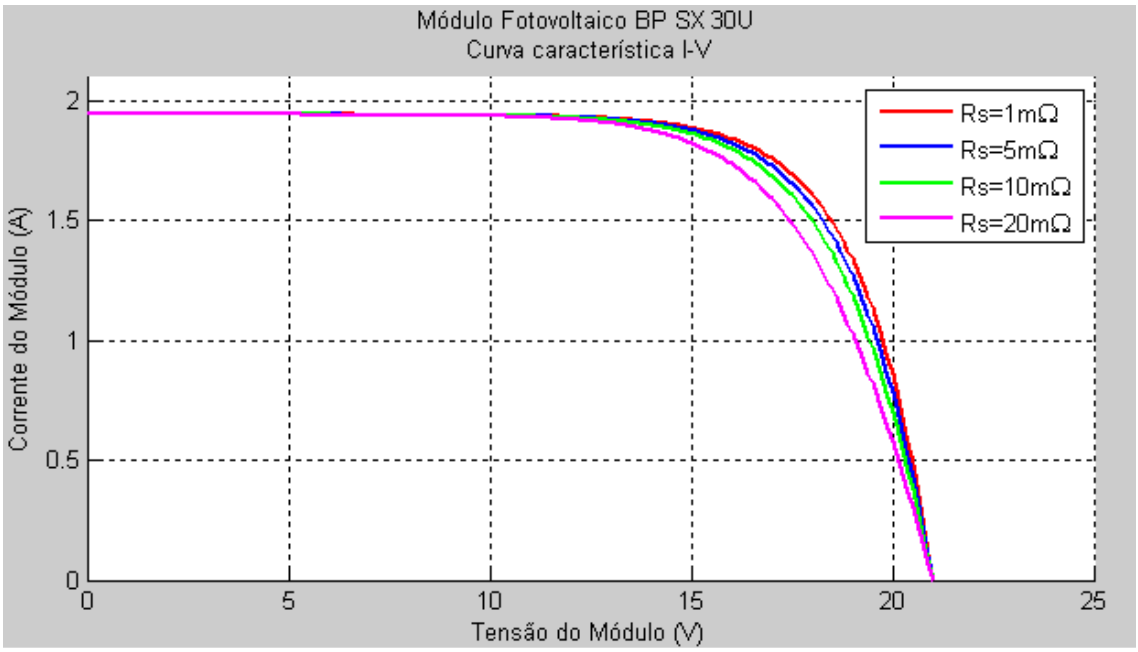


Figura 2.24 - Efeito produzido pela resistência série (*Rs*) da célula fotovoltaica nas curvas características I-V

2.6. Conclusões

Neste capítulo analisaram-se as configurações típicas de sistemas fotovoltaicos, podendo estes funcionar ligados ou independentes da rede eléctrica. Estes sistemas foram denominados na literatura por sistemas fotovoltaicos ligados à rede eléctrica, híbridos e autónomos. Foram identificados os aspectos e os módulos mais importantes e habitualmente mais utilizados relacionados com estes sistemas.

Ainda neste capítulo apresentaram-se os princípios de funcionamento de uma célula fotovoltaica e, identificaram-se os principais tipos de células fotovoltaicas fabricadas essencialmente através de cristais de silício. O circuito

eléctrico equivalente da célula fotovoltaica e o seu modelo matemático também foram analisados, tanto na versão de modelo simplificado, como na versão de modelo aperfeiçoado.

Dos modelos apresentados o circuito eléctrico equivalente escolhido para a simulação foi o que complementa uma fonte de corrente (I_{sc}), um díodo (D) e uma resistência série (Rs). Através desta simulação verificaram-se os parâmetros que influenciam no comportamento de uma célula e consequentemente num painel fotovoltaico e os efeitos que os mesmos criam nas curvas características I-V e P-V.

CAPÍTULO 3

Interface entre o Painel Fotovoltaico e a Carga

3.1. Introdução

As soluções em iluminação externa com energia solar fotovoltaica tem sofrido alterações ao longo dos anos, com inovações seguras e sustentáveis. O conversor CC-CC é um dos elementos de maior importância num sistema fotovoltaico [23], pois está encarregue pela transferência de energia entre o painel solar e o barramento CC, que neste caso em concreto é composto por uma bateria de ácido chumbo para efectuar o armazenamento de energia. Como referido anteriormente, este elemento não realiza apenas o trânsito da potência e o sistema de controlo associado ao mesmo, mas também é o responsável por manter o funcionamento do sistema fotovoltaico sempre em valores próximos do ponto de máxima potência. Outro factor importante que torna este componente relevante é que a maior parte das perdas de um sistema fotovoltaico focam-se no conversor, tornando este elemento marcante em termos competitivos [28] [29].

Neste capítulo é analisado o funcionamento dos principais algoritmos para o rastreamento do ponto de máxima potência. Para cada técnica de controlo MPPT é apresentada uma descrição teórica e expostos os algoritmos com o intuito de explicar o princípio de funcionamento. É realizada a comparação entre as várias técnicas para posteriormente se optar, de forma sustentada, por um método de forma a realizar as simulações computacionais e a implementação prática.

O armazenamento de energia é um tema central no aproveitamento da energia solar nos sistemas fotovoltaicos autónomos, dado que a produção e o consumo de energia não coincidem, quer ao longo do dia, quer ao longo do

ano [16]. A utilização de um sistema de armazenamento de energia é necessária para reduzir a influência da oscilação da potência gerada provocada pelas condições climatéricas. As baterias são a componente dos sistemas fotovoltaicos onde acontece um tipo de reacção química reversível capaz de armazenar energia eléctrica, que posteriormente pode ser utilizada. A energia eléctrica é transformada em energia química quando a bateria é carregada e o contrário acontece quando a bateria é descarregada [30]. Existem diversificados tipos de baterias para variadas aplicações, contudo, nas instalações de energia solar, as baterias de ácido chumbo são o tipo mais comum para o armazenamento de energia. Estas baterias têm a melhor relação preço-efeciência e conseguem assegurar e atestar elevadas e reduzidas correntes de carga com uma boa eficiência [16]. Devido a estas características, as baterias de ácido chumbo são as utilizadas ao longo desta dissertação e, serão estudadas de forma mais detalhada. Serão descritas características relevantes, tais como: capacidade, ciclos de operação, profundidade de descarga, estado e processo de carga entre outras. Um regulador de carga é necessário para limitar a profundidade de descarga da bateria, para limitar a corrente de carregamento fornecida à bateria e para evitar sobreaquecimento. Este capítulo explica também o funcionamento das baterias sob o ponto de vista da modelação e é ainda feita a comparação entre as diferentes tecnologias de construção de baterias e respectivos modelos, referindo as características desejáveis para as baterias em sistemas fotovoltaicos. Diferentes abordagens serão equiparadas para o estudo destes elementos fundamentais num sistema fotovoltaico autónomo.

Neste capítulo serão ainda confrontadas topologias de conversores CC-CC que melhor se enquadram no sistema fotovoltaico desenvolvido. Depois da escolha da topologia que mais se adequa, o conversor será dimensionado e modelado com objectivo de efectuar uma simulação do mesmo para se efectuar um controlador adequado.

3.2. Maximum Power Point Tracking

A geração de energia a partir de sistemas fotovoltaicos tem vindo a ganhar cada vez mais importância devido às suas inúmeras vantagens e é utilizada numa grande variedade de aplicações. No entanto, o custo elevado da instalação e a baixa eficiência de conversão das células solares são os

principais obstáculos da geração de energia através de painéis fotovoltaicos. Para melhorar a eficiência energética e dessa forma reduzir os custos da energia gerada é importante que os módulos num sistema fotovoltaico operem o maior tempo possível no MPP (*Maximum Power Point*) e, como já foi visto no Capítulo 2, esse ponto varia ao longo do tempo, dependendo das condições de operação relacionadas com a radiação solar e com a temperatura das células fotovoltaicas. Assim, para garantir essa situação, é necessária utilizar um método que procure aquele ponto de funcionamento (MPP), mesmo com as alterações climatéricas.

A curva característica I-V dos módulos fotovoltaicos representada na Figura 3.1, a azul, indica que o ponto de funcionamento do módulo fotovoltaico, que é o ponto de intercepção da curva I-V com a linha da carga, a verde, não é o mesmo que o MPP do painel, como se verifica também na mesma figura.

O MPPT (*Maximum Power Point Tracking*) é uma técnica utilizada para rastrear o ponto de máxima potência, inserida em circuitos electrónicos de potência para extrair o máximo de energia a partir de sistemas fotovoltaicos. Um circuito MPPT é constituído por dois blocos distintos que são o conversor de tensão CC-CC e o seu sistema de controlo, como se pode verificar no diagrama de blocos da Figura 3.2.

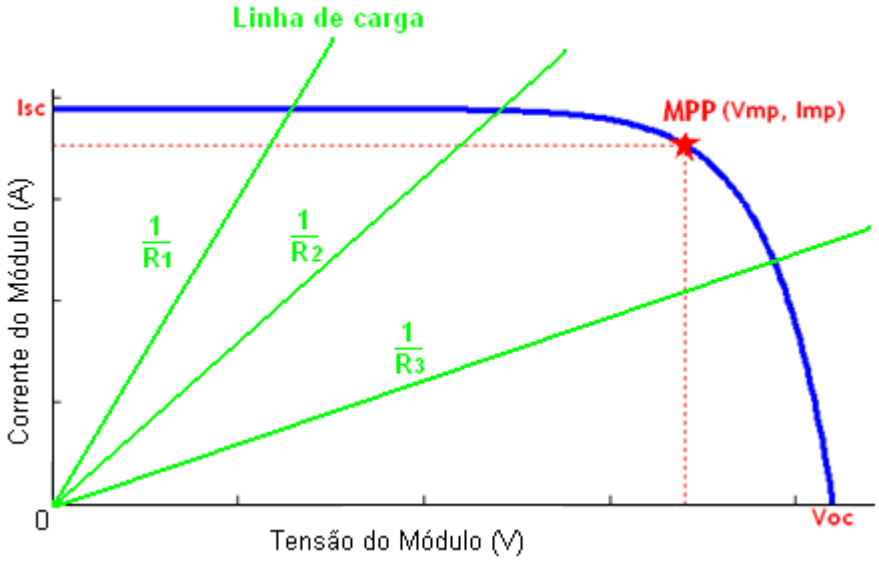


Figura 3.1 – Intercepção da curva característica I-V do módulo fotovoltaico com a linha da carga.

Para rastrear o ponto de máxima potência de um módulo fotovoltaico é necessário um algoritmo de controlo MPPT. Com base no algoritmo, o conversor CC-CC é comutado com um sinal PWM correspondente aos cálculos

realizados no sistema de controlo do MPPT.

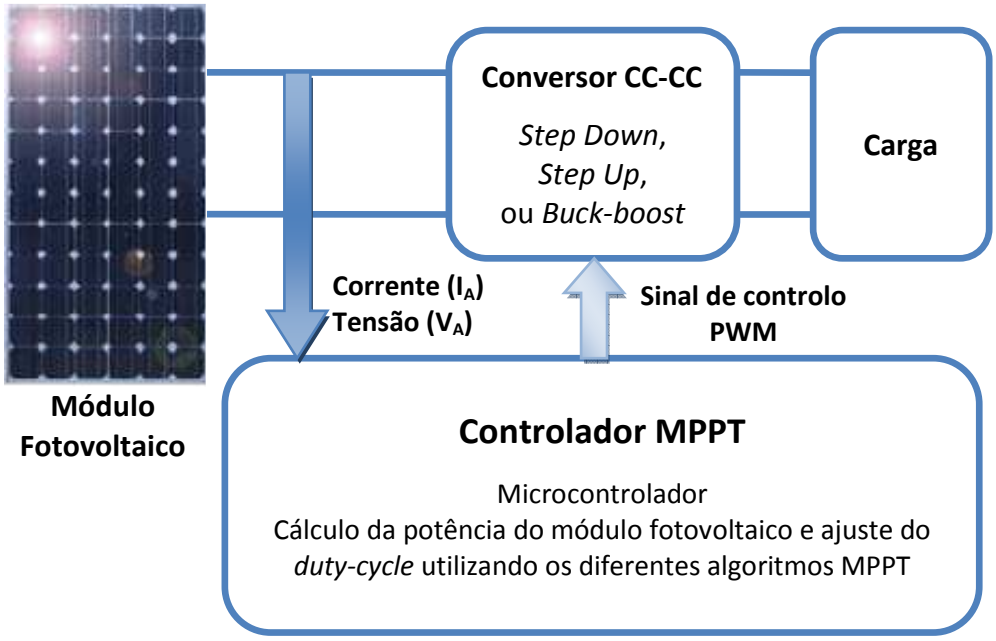


Figura 3.2 - Sistema fotovoltaico com um circuito MPPT à saída do painel

3.2.1. Técnicas de Rastreamento do MPP

Até agora, muitas pesquisas foram realizadas e várias técnicas MPPT foram desenvolvidas e implementadas. As técnicas variam em complexidade, velocidade de convergência, custo, sensores necessários, escala de eficácia, implementação em *hardware*, popularidade entre outros aspectos.

Em [31], [32] e [33] foram elaborados estudos comparativos entre as principais técnicas e, os autores coincidem em dizer que os algoritmos MPPT mais utilizados são: tensão constante (CV), corrente de curto-circuito (SC), perturbação e observação (P&O) e condutância incremental (IncCond).

3.2.1.1. Tensão Constante (CV)

O algoritmo que implementa a técnica de Tensão Constante é um dos mais simples para o controlo do MPPT. Esta técnica considera que a tensão de máxima potência (V_{mp}) tem uma relação linear com a tensão de circuito aberto (V_{oc}) e despreza alterações que possam ocorrer nos valores da radiação solar e da temperatura da célula [31].

$$Vmp = K_1 * Voc \tag{3.1}$$

Onde K_1 é designado por factor de tensão e depende das características dos painéis fotovoltaicos. Este valor é sempre inferior a 1 [33], contudo é difícil determina-lo e geralmente é calculado por meios empíricos, determinando V_{mp} e V_{oc} para diferentes condições climatéricas. O valor de K_1 é variável e encontra-se vulgarmente entre 0,73 e 0,8 sendo que o valor mais comum é 0,76 [33]. Depois de determinado o valor de K_1, V_{mp} é calculado através da equação (3.1). Para isso desliga-se periodicamente o conversor CC-CC do módulo fotovoltaico e mede-se a tensão de circuito aberto V_{oc}. O valor de V_{mp}, que é utilizado como referência, é comparado com o valor da tensão proveniente do painel fotovoltaico (V_a) o que gera uma sinal de erro que é utilizado para ajustar a tensão de controlo (V_c). Todo este processo está caracterizado no fluxograma desta técnica apresentado na Figura 3.3.

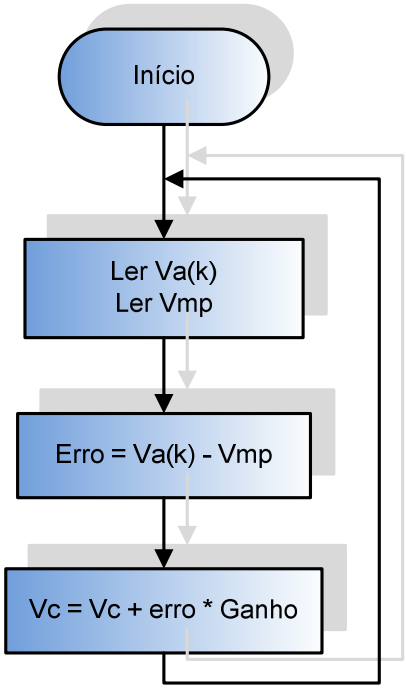


Figura 3.3 - Algoritmo MPPT da técnica Tensão Constante (CV)

Quando os níveis de radiação solar incidente sobre o módulo fotovoltaico são baixos esta técnica é particularmente efectiva [34] superando outros métodos utilizados. Assim, em algumas aplicações este algoritmo é combinado com outros métodos. Todavia, o MPPT que baseia o seu controlo nesta técnica apresenta algumas limitações. O erro em regime permanente devido à relação existente entre V_{oc} e V_{mp} não ser constante é um dos principais obstáculos à utilização do método Tensão Constante.

3.2.1.2. Corrente de Curto-Circuito (SC)

Esta técnica é semelhante ao método Tensão Constante, e o rastreamento do MPP é conseguido através da utilização da corrente de funcionamento do módulo fotovoltaico (I_a) como fonte de controlo do conversor CC-CC. O fundamento deste algoritmo é baseado numa relação praticamente linear para diferentes níveis de radiação solar entre a corrente no ponto de máxima potência (I_{mp}) e a corrente de curto-circuito (I_{sc}) [34].

$$Imp = K_2 * Isc \tag{3.2}$$

Onde K_2 é um factor de relação constante muito próximo do valor 1, mas sempre menor que 1 [33]. Quando a corrente de saída do módulo fotovoltaico é aproximadamente 90% da corrente de curto-circuito (I_{sc}) o sistema fotovoltaico opera no MPP, ou seja, o valor mais comum de K_2 é 0,9 [33]. Com o valor de K_2 determinado a corrente no ponto de máxima potência é calculado com base na equação (3.2). O fluxograma que caracteriza esta técnica de rastreamento do MPP é apresentado na Figura 3.4.

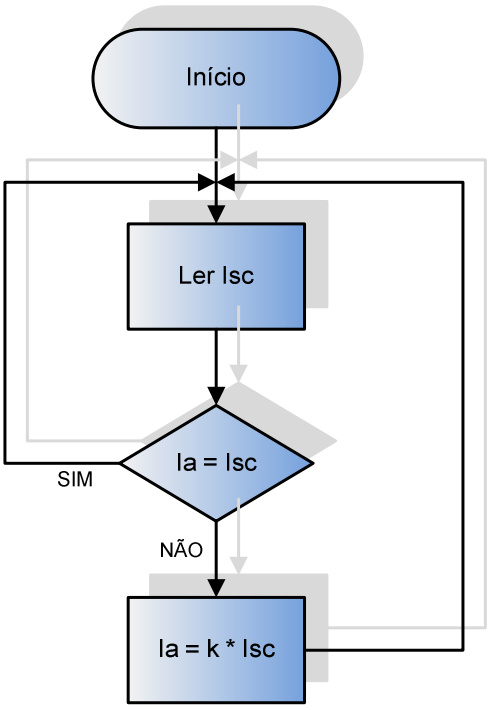


Figura 3.4 - Algoritmo MPPT da técnica Corrente de Curto-Circuito (SC)

Esta técnica permite uma velocidade de seguimento do MPP suficiente rápida, mas devido à dificuldade de medir com precisão o valor de I_{sc} em situações reais o rastreamento do ponto de máxima potência não é muito

efectivo. Sempre que a corrente de curto-circuito I_{sc} é medida a tensão proveniente do módulo fotovoltaico é nula e nenhuma energia é produzida, diminuindo em muito o rendimento do sistema.

3.2.1.3. Condutância Incremental (IncCond)

O método Condutância Incremental baseia a sua técnica na análise da curva da potência em função da tensão (curva P-V) do módulo fotovoltaico. A curva P-V é analisada com base na sua inclinação, sendo zero no ponto de máxima potência, positiva à esquerda do MPP e negativa à direita do MPP. A Figura 3.5 mostra as três regiões de operação da potência de saída do módulo fotovoltaico BP SX30U considerando uma radiação solar incidente de 1000W/m^2 com uma temperatura constante de 25ºC.

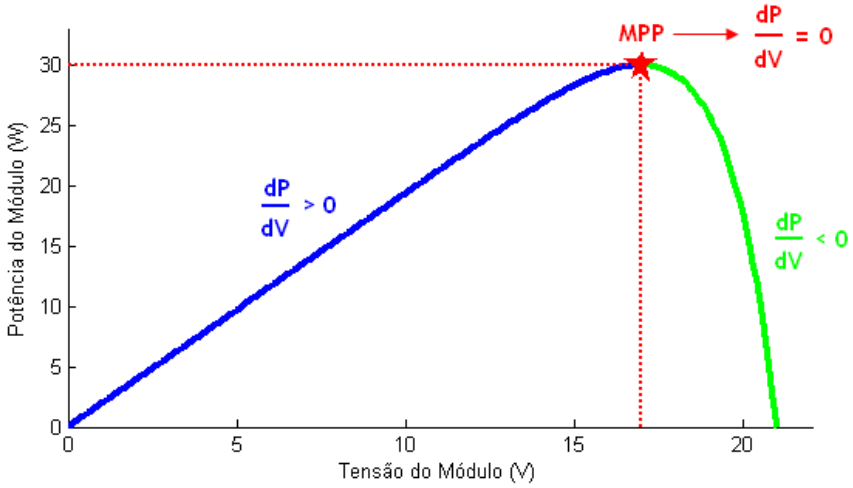


Figura 3.5 – Curva PV do módulo fotovoltaico

$$\begin{cases} \frac{dP}{dV} = 0; \text{ no ponto MPP} \\ \frac{dP}{dV} > 0; \text{ à esquerda do MPP} \\ \frac{dP}{dV} < 0; \text{ à direita do MPP} \end{cases}$$

Então, a localização do ponto de máxima potência extraída a partir de sistemas fotovoltaicos com controlo MPPT baseado na técnica Condutância Incremental é dada pela equação (3.3).

$$\frac{dP}{dV} = 0 \tag{3.3}$$

A equação (3.3) reescrita resulta na equação (3.4).

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(IV)}{dV} = I + V\,\frac{dI}{dV} \tag{3.4}$$

Dividindo cada membro da equação (3.4) por V, tem-se a equação (3.5).

$$\frac{1}{V}\,\frac{dP}{dV} = \frac{I}{V} + \frac{dI}{dV} \tag{3.5}$$

No MPP, como $\frac{dP}{dV} = 0$ a equação (3.5) pode ser escrita em ordem à condutância incremental $\frac{dI}{dV}$. Daí resulta a equação (3.6).

$$\frac{dI}{dV} = -\frac{I}{V} \tag{3.6}$$

O ponto de máxima potência pode assim ser controlado por meio da comparação da condutância instantânea (I/V) com a condutância incremental $(\mathrm{dI}/\mathrm{dV})$. Inicialmente são obtidos os valores actuais da tensão $V_a(k)$ e corrente $I_a(k)$ do módulo fotovoltaico. Depois, são calculadas as mudanças incrementais, dI e dV, subtraindo os valores actuais e os anteriores da tensão (V_a) e corrente (I_a).

Com base na equação (3.6), no ponto de máxima potência, $(dI/dV) = -(I/V)$, nenhuma acção é efectuada e, os valores de $V_a(k\text{-}1)$ e $I_a(k\text{-}1)$ são actualizados e o algoritmo volta ao início. Quando $(dI/dV) \neq -(I/V)$ a tensão de saída do módulo fotovoltaico V_a é ajustada com um incremento no sentido de mover a tensão do painel fotovoltaico até à tensão de máxima potência V_{mp}. Assim que o MPP é alcançado (dV=0) o algoritmo força o sistema a operar constantemente nesse ponto até que alterações climáticas sejam detectadas. Essas alterações são detectadas através de dI≠0 e o ajuste da tensão de saída V_a depende do sinal de dI.

Este algoritmo de controlo MPPT, ilustrado no fluxograma da Figura 3.6, aumenta ou diminui a tensão de saída (V_a) do módulo fotovoltaico com base num incremento (ΔV) de maneira a acompanhar o ponto de máxima potência. O tamanho do incremento ΔV determina a velocidade com que o MPPT é controlado. Incrementos maiores levam a uma aceleração da busca do MPP,

todavia o sistema pode não funcionar exactamente no ponto de máxima potência, existindo oscilações em torno deste. Para baixos níveis de radiação solar este algoritmo de controlo MPPT não apresenta resultados satisfatórios [35]. Contudo, este método apresenta um erro em regime permanente pequeno [36], apresentando melhor aproveitamento da energia gerada pelos módulos fotovoltaicos quando comparado com as técnicas anteriormente abordadas.

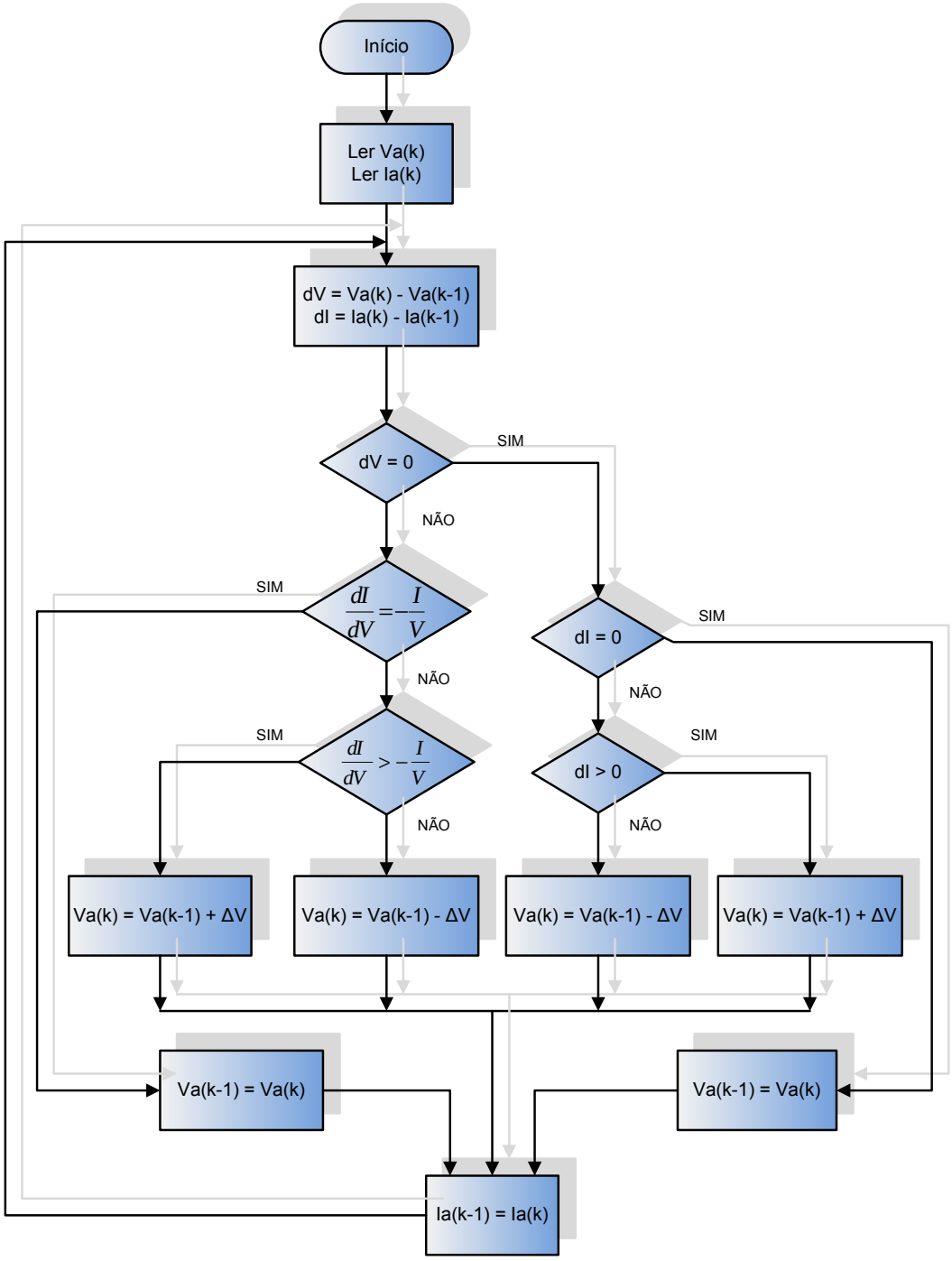


Figura 3.6 - Algoritmo MPPT da técnica Condutância Incremental (IncCond)

Existem algumas variantes do método de Condutância Incremental. Uma propõe um algoritmo que situa o ponto de funcionamento do módulo fotovoltaico perto do MPP numa primeira fase, e em seguida utiliza o controlo MPPT IncCond para situar exactamente o ponto de máxima potência [31]. Para situar o ponto de funcionamento inicial do módulo fotovoltaico perto do MPP é necessário efectuar um controlo que regula o conversor CC-CC de maneira a que o ponto inicial de operação é definido para corresponder a uma resistência de carga proporcional à razão da tensão de circuito aberto V_{oc} com a corrente de curto-circuito I_{sc} do módulo fotovoltaico [31]. Esta abordagem assegura que o MPP seja alcançado não havendo dessa forma oscilações em torno deste.

Outra maneira eficaz de utilizar a técnica IncCond é utilizar a condutância instantânea e o aumento da condutância incremental para gerar o sinal de erro, dado pela equação (3.7) [31].

$$e = \frac{I}{V} + \frac{dI}{dV} \tag{3.7}$$

Da equação (3.3) sabe-se que a condutância incremental $\frac{dI}{dV}$ é zero no MPP, logo o sinal de erro e também vai a zero no mesmo ponto. Um controlador proporcional integral (PI) pode ser utilizado para conduzir o sinal de erro a zero.

3.2.1.4. Perturbação e Observação (P&O)

Usualmente a técnica MPPT mais utilizada é o algoritmo Perturbação e Observação, também conhecido por método de *Hill-Climbing* [33]. Esta técnica é utilizada em variadas aplicações devido à sua fácil implementação. O seu funcionamento consiste em periodicamente perturbar (aumentar ou diminuir) a tensão de saída (V_a) ou a corrente de saída (I_a) do módulo fotovoltaico, e observar o comportamento da potência de saída (P_a). Se existir um aumento na potência produzida o controlador move o ponto de máxima potência nesse sentido e, a próxima perturbação continua na mesma direcção. Caso contrário, se a potência produzida diminuir, o sistema é perturbado no sentido inverso.

O valor da perturbação introduzida tem um valor fixo, de alguns *volts*, dependente da tensão de saída do módulo e ocorre a cada ciclo de funcionamento [34]. Desta forma, o MPP nunca será atingindo, pois o valor das

perturbações provoca que o sistema, em regime permanente, oscile em torno deste ponto desperdiçando um pouco de energia disponível nos módulos. Esta situação ocorre nomeadamente quando as condições da radiação solar variam lentamente (caso de um dia normal de Verão).

A Figura 3.7 mostra graficamente os quatro casos possíveis de como se pode encontrar o MPP e a acção de controlo a cada um deles para uma determinada condição climática. A evolução da potência de saída do módulo fotovoltaico está representada na figura com as setas azuis e, o respectivo sentido da perturbação representada com as setas vermelhas.

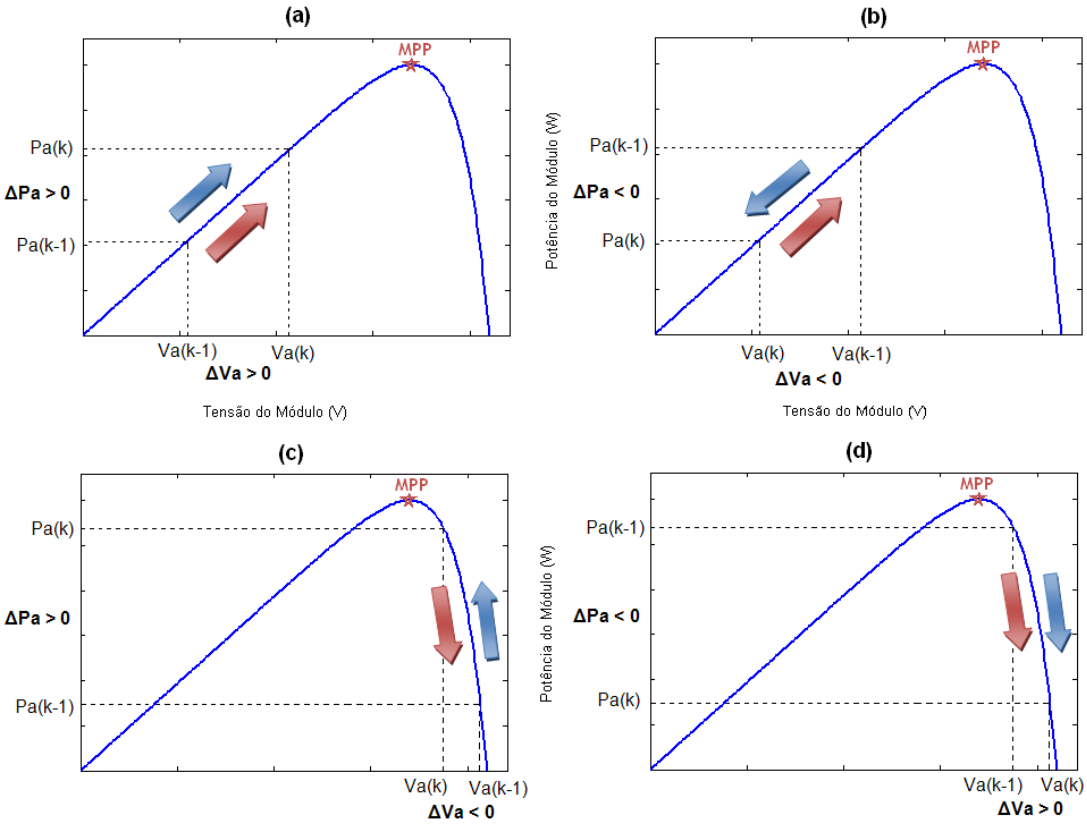


Figura 3.7 – Evolução da potência do módulo fotovoltaico e respectivo sentido da perturbação

a) **$\Delta P_a = P_a(k) - P(k-1) > 0$ e $\Delta V_a = V_a(k) - V(k-1) > 0$:** Neste caso o incremento da potência de saída ΔP_a, definido como a potência actual menos a potência da amostra anterior, é positivo. Igualmente positivo é o incremento da tensão de saída do módulo fotovoltaico ΔV_a. A acção de controlo a realizar neste caso é diminuir o ciclo de trabalho de maneira a que a tensão de saída do módulo fotovoltaico aumente até alcançar o MPP.

b) **$\Delta P_a = P_a(k) - P(k-1) < 0$ e $\Delta V_a = V_a(k) - V(k-1) < 0$:** Neste caso o incremento da potência ΔP_a e da tensão de saída ΔV_a é negativo. A acção de controlo a realizar é igual à do caso a), ou seja, diminuir o ciclo de trabalho para que aumenta a tensão de saída do módulo fotovoltaico até alcançar o ponto de máxima potência.

c) **$\Delta P_a = P_a(k) - P(k-1) > 0$ e $\Delta V_a = V_a(k) - V(k-1) < 0$:** Neste caso o incremento da potência ΔP_a é positivo, enquanto o incremento da tensão de saída do painel fotovoltaico é negativo. A acção de controlo a realizar nesta situação é aumentar o ciclo de trabalho para que a tensão de saída diminua até alcançar o MPP.

d) **$\Delta Pa = Pa(k) - P(k-1) < 0$ e $\Delta Va = Va(k) - V(k-1) > 0$:** Neste caso o incremento da potência ΔP_a é negativo, enquanto o incremento da tensão de saída do painel fotovoltaico é positivo. A acção de controlo a realizar é igual à do caso c), ou seja, aumentar o ciclo de trabalho para a tensão de saída diminuir até alcançar o ponto de máxima potência.

O tamanho da perturbação (ΔV) aplicado à tensão de saída do módulo fotovoltaico, para que dessa forma altere o ciclo de trabalho, é um parâmetro essencial nesta técnica de controlo MPPT. As oscilações referidas anteriormente relativas ao MPP podem ser minimizadas reduzindo o tamanho da perturbação. Contudo, perturbações muito pequenas tornam este método lento na busca do ponto de máxima potência.

O período de amostragem (Ta) é outro parâmetro que é importante definir para o bom funcionamento deste método. Este corresponde ao intervalo de tempo em que é amostrada a tensão e a corrente do módulo fotovoltaico. Períodos de amostragem pequenos permitiriam chegar rapidamente ao MPP, detectando também rapidamente mudanças nas condições climatéricas. Contudo, o Ta deve ser superior ao tempo de estabilização da tensão de saída do conversor para evitar ainda mais instabilidades no controlo MPPT [37].

A Figura 3.8 mostra o fluxograma da técnica Perturbação e Observação.

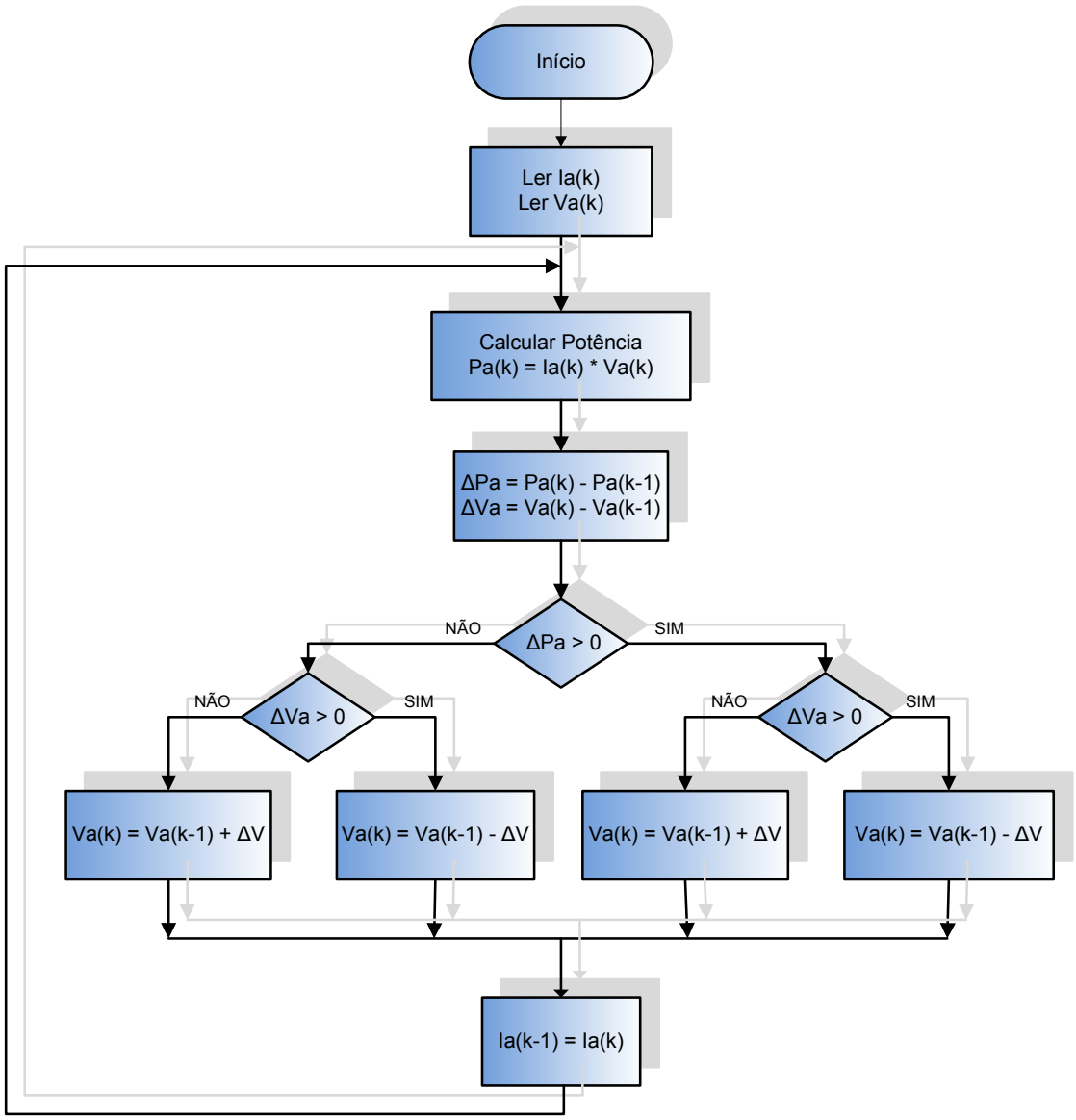


Figura 3.8 - Algoritmo MPPT da técnica Perturbação e Obervação (P&O)

3.3. Baterias

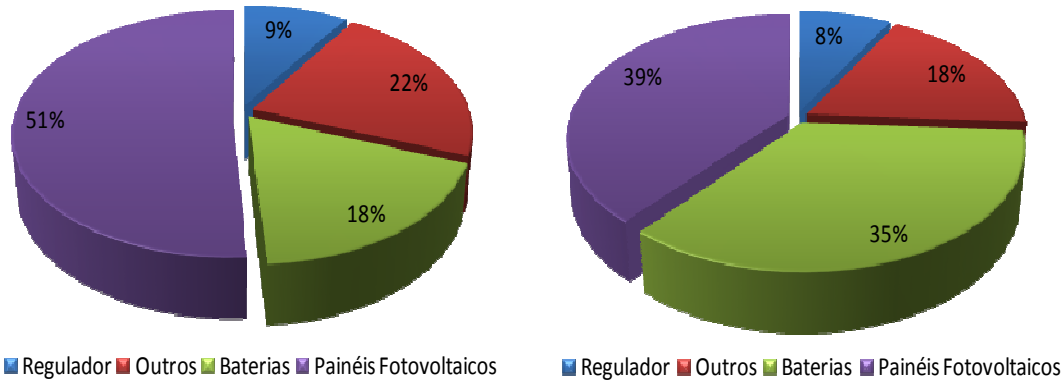
Como tecnologia de armazenamento de energia eléctrica as baterias electroquímicas são as mais antigas, contudo ainda hoje as mais utilizadas.

Para uma definição muito superficial as baterias podem ser classificadas em dois tipos: baterias primárias de uso único, não recarregáveis e baterias secundárias que podem ser recarregadas [38].

O armazenamento de energia é um tema central no aproveitamento da energia solar nos sistemas fotovoltaicos autónomos, dado que a produção e o consumo de energia não coincidem, quer ao longo do dia, quer ao longo do ano [16]. As baterias nos sistemas fotovoltaicos são utilizadas como sistema de armazenamento de energia, gerada pelos painéis fotovoltaicos durante o dia, tornando-a posteriormente utilizável à noite ou em períodos de pouca ou

nenhuma radiação solar, garantindo o fornecimento constante de energia. Outra função que as baterias podem exercer num sistema fotovoltaico é fornecer corrente mais elevada à carga que a corrente máxima produzida pelos painéis fotovoltaicos. Assim, as células solares em conjunto com o banco de baterias trabalham para fornecer energia à carga de forma mais constante ou intensa do que poderia ser gerada exclusivamente pelo painel fotovoltaico.

O sistema de armazenamento de energia nos sistemas fotovoltaicos autónomos tem um carácter relevante, quando também é analisada a parcela de participação nos custos totais do sistema. Numa primeira fase, o investimento inicial para a instalação do sistema está principalmente centralizado no componente de geração de energia eléctrica, ou seja, nos painéis fotovoltaicos. A Figura 3.9 (a) mostra a participação percentual dos vários elementos que compõem o sistema fotovoltaico no momento do investimento inicial [39]. Perante outro ponto de vista, se forem considerados os custos de manutenção do sistema, ou seja, se for feita uma análise do investimento do custo do ciclo de vida para cada componente do sistema e considerando uma reposição do sistema de armazenamento de energia a cada quatro anos, os custos anuais em baterias é aproximado aos dos painéis fotovoltaicos, como se pode verificar perante o gráfico da Figura 3.9 (b) [39]. Assim, este acréscimo na percentagem dos custos deste componente do sistema fotovoltaico deve-se ao facto das baterias terem uma vida útil muito inferior aos demais componentes do mesmo.



(a) (b)

Figura 3.9 - Participação percentual de cada componente de um sistema fotovoltaico autónomo considerando: (a) o investimento inicial; (b) os custos anuais de cada componente de sistema

Os sistemas fotovoltaicos autónomos geralmente estão instalados em localidades isoladas ou de difícil acesso, por isso as baterias destinadas a esses sistemas devem apresentar um rendimento energético elevado e necessidades mínimas de manutenção.

3.3.1. Tipos de Baterias

De um modo geral as baterias dividem-se em dois grandes grupos: as baterias primárias e as baterias secundárias. As baterias primárias são dispositivos electroquímicos que, uma vez esgotados os reagentes que produzem a energia eléctrica, são descartadas, pois não podem ser carregadas. Estas produzem energia a partir de uma reacção electroquímica, normalmente irreversível, o que as inutiliza. De outra forma, as baterias secundárias podem ser regeneradas, ou seja, através da aplicação de uma corrente eléctrica nos seus terminais pode reverter as reacções responsáveis pela geração de energia e dessa forma recarregar a bateria [40]. Nos sistemas fotovoltaicos de geração de energia eléctrica utilizam-se baterias que podem ser recarregadas, ou seja, baterias secundárias.

Os tipos de baterias divergem nas suas características no que diz respeito à segurança, densidade energética, potência, custo, vida útil e facilidade de integração [23]. Estas características são os factores principais a ter em conta na escolha do tipo a utilizar nos sistemas fotovoltaicos. Entre variados tipos de baterias secundárias as mais utilizadas em sistemas fotovoltaicos são as de ácido chumbo, níquel cádmio e as de lítio. Na Tabela 3.1, adaptada de [41], apresenta-se uma comparação dos diferentes tipos de baterias referidos.

Tabela 3.1 - Comparação entre os diferentes tipos de baterias[1]

	Ácido Chumbo	Níquel Cádmio	Lítio
Segurança	+	0	0
Densidade Energética	-	+	++
Potência	+	++	+
Custo	+	-	0
Capacidade de reciclagem	++	0	0

[1] ++ Muito Bom; + Bom; 0 Satisfatório; - Mau; -- Muito Mau

3.3.2. Baterias de Ácido Chumbo

As baterias de ácido chumbo são as mais utilizadas para o armazenamento de energia em sistemas fotovoltaicos, contendo 90% do mercado, devido principalmente ao seu baixo custo e a sua grande disponibilidade no mercado para uma larga variedade de aplicações [36].

As baterias de ácido chumbo são denominadas por este nome, pois a sua matéria activa é o chumbo e seus respectivos compostos. Estas baterias são constituídas por um conjunto de células ou elementos, que são as unidades electroquímicas mais básicas. Desta forma, uma bateria de ácido chumbo é composta por uma placa (eléctrodo) positiva, designada de cátodo, de dióxido de chumbo (PbO_2), uma placa negativa de chumbo (Pb), chamada de ânodo e, o electrólito, que é o condutor iónico, constituído por uma solução aquosa de ácido sulfúrico (H_2SO_4), providenciando o meio de transferência de carga entre o ânodo e o cátodo. Ambos os eléctrodos de polaridades opostas podem conter uma certa percentagem de antimónio (Sb) na sua composição [36]. A razão principal para a utilização deste suplemento nas placas é que ele aumenta, significativamente, a vida útil da bateria. A Figura 3.10 mostra a estrutura base de uma bateria de ácido chumbo retirada dos catálogos das baterias Varta [42].

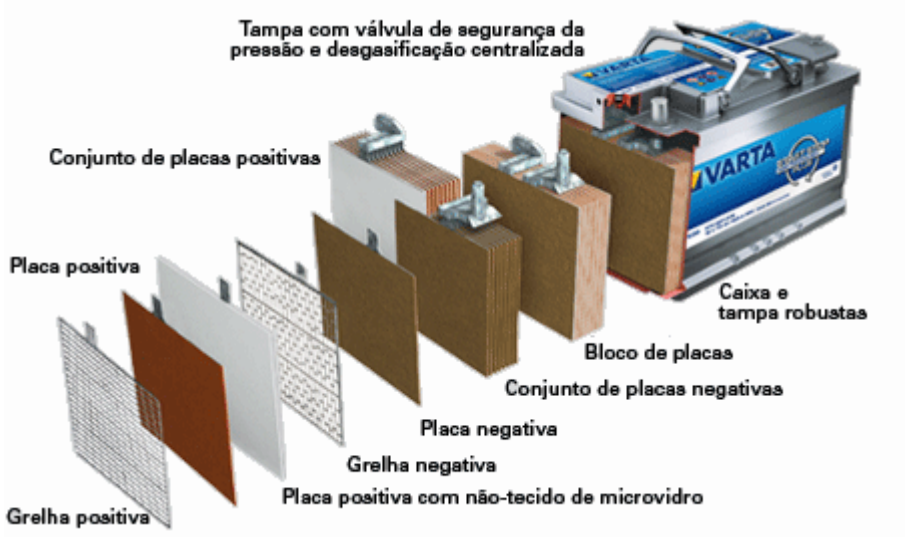


Figura 3.10 – Corte transverssal de uma bateria de Ácido Chumbo e respectiva estrutura [42]

Os componentes que compõem as baterias são interligados convenientemente no interior da bateria de maneira a definir a sua capacidade e tensão nominal. A tensão nominal da célula de uma bateria de ácido chumbo

é de 2V [16], assim para se atingir tensões mais elevadas devem ser montadas em bloco, dentro de um invólucro comum, sendo internamente ligadas em série. Habitualmente, as baterias apresentam tensões de 12V, produzindo-se em menor escala de 6 e 24V.

3.3.2.1. Princípios Electroquímicos e Reacções

O processo químico de geração de energia eléctrica através de reacções químicas é designado de oxidação e redução. Quando o elemento da reacção química perde electrões, este oxida-se e é chamado de agente redutor e o processo é chamado de redução. De outra forma, o elemento da reacção que adquire electrões é chamado de agente oxidante e o processo é chamado de oxidação [40]. Durante o processo de carga e descarga de uma bateria de ácido chumbo acontece tanto o processo de redução como o de oxidação. Assim, a tensão da bateria aumenta ou diminui, por vezes até determinados limites, além dos quais os componentes se modificam de forma irreversível. Por menores que sejam os estragos, nestes casos eles tornam-se acumulativos, ou seja, quando a tensão está fora dos limites conduz à deterioração da bateria e à diminuição da sua vida útil. Os limites de tensão mais comuns para as células de uma bateria são de aproximadamente 1,75V, após um descarregamento completo, a aproximadamente 2,12V, quando está carregada, para uma temperatura de 25ºC [43]. Na Tabela 3.2 pode ver-se para as baterias de ácido chumbo, a relação existente entre a tensão aos terminais da bateria e o seu nível de carga.

Tabela 3.2 – Relação entre o nível de carga das baterias e a tensão [43]

Estado de carga	Bateria 12V	Tensão por célula
100%	12,7V	2,12V
90%	12,5V	2,08V
80%	12,42V	2,07V
70%	12,32V	2,05V
60%	12,20V	2,03V
50%	12,06V	2,01V
40%	11,9V	1,98V
30%	11,75V	1,96V
20%	11,58V	1,93V
10%	11,31V	1,89V
0%	10,5V	1,75V

Durante a descarga é formado sulfato de chumbo ($PbSO_4$) em ambas as placas sendo removido o ácido sulfúrico (H_2SO_4) do electrólito. Durante o carregamento é formado dióxido de chumbo (PbO_2) no cátodo e no ânodo é formado chumbo (Pb) libertando-se ácido sulfúrico (H_2SO_4) no electrólito.

De seguida na Tabela 3.3 pode observar-se as reacções químicas durante a descarga.

Tabela 3.3 – Reacções químicas da bateria de ácido chumbo durante o processo de descarga

Bateria de ácido chumbo recarregável – Reacções químicas	
Placa negativa	$Pb + SO_4^{--} \longrightarrow PbSO_4 + 2e^-$
Placa positiva	$PbO_2 + SO_4^{--} + 4H^+ + 2e^- \longrightarrow PbSO_4 + 2H_2O$
Reacção global	$PbO_2 + Pb + 2H_2SO_4 \longrightarrow 2PbSO_4 + 2H_2O$

Estas reacções químicas são reversíveis, ocorrendo no sentido inverso durante o processo de carregamento.

Durante o processo de descarga, na placa negativa, o chumbo (Pb) reage com o anião ácido (SO_4^{--}) que se encontra no electrólito, resultando da reacção o sulfato de chumbo ($PbSO_4$) e a libertação de dois electrões que circulam pelo circuito externo. Na placa positiva, o dióxido de chumbo (PbO_2) reage com o anião ácido (SO_4^{--}), mais quatro iões H^+ e os dois electrões provenientes da placa negativa via circuito externo, gerando como resultado dessa reacção sulfato de chumbo ($PbSO_4$) e água (H_2O). A presença de água diminui a concentração de ácido no electrólito, e consequentemente a tensão na bateria [44].

No processo de carga, na placa negativa o sulfato de chumbo ($PbSO_4$) reage com dois electrões vindos de uma fonte externa, produzindo com essa reacção chumbo (Pb) e o anião ácido (SO_4^{--}). Na placa positiva, o sulfato de chumbo ($PbSO_4$) reage com a água (H_2O) produzindo de novo dióxido de chumbo (PbO_2), o anião ácido (SO_4^{--}), quatro iões H^+ e dois electrões retornam à fonte presente no circuito externo. Neste processo o ácido sulfúrico (H_2SO_4) é libertado para o electrólito, aumentando a concentração do ácido e consequentemente a tensão da bateria [44].

Os processos de carga e descarga das baterias de ácido chumbo podem ser melhor compreendidos visualizando a Figura 3.11.

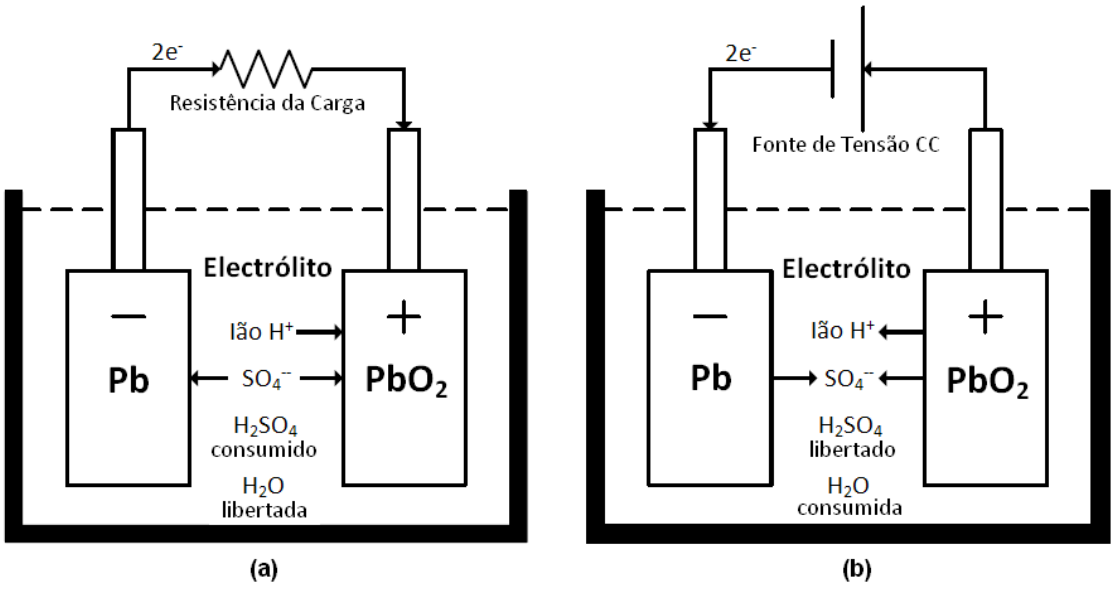


Figura 3.11 – Diagrama simplificado de uma bateria de ácido chumbo: (a) processo de descarga; (b) processo de carga

O processo de carga e descarga pode representar-se através de uma única reacção global que já inclui as reacções individuais de cada placa, como se pode verificar pela reacção química representada na Tabela 3.3.

A regeneração da carga não é total e a capacidade da bateria tende a diminuir por causa do processo de auto-descarga da placa positiva. O dióxido de chumbo (PbO_2) reage com iões H^+ libertando água (H_2O) e oxigénio (O_2). Assim, a concentração de ácido no electrólito diminui proporcionando também a queda na tensão da bateria. A temperatura influencia a velocidade da reacção global. O endurecimento do sulfato de chumbo ($PbSO_4$) é outra das causas que deteriora a capacidade da bateria, fazendo com que o mesmo não produza dióxido de chumbo (PbO_2) no processo de carga [44].

3.3.2.2. Capacidade

A capacidade de armazenamento de energia de uma bateria é a quantidade de carga eléctrica medida através da multiplicação da corrente de descarga pelo tempo de autonomia, expressa em Ampére-hora (Ah). Dessa forma a capacidade nominal de uma bateria em Ah é a quantidade de carga que o acumulador é capaz de fornecer sob determinadas condições, isto é, com determinada corrente de descarga até uma determinada tensão (tensão de corte), a uma dada temperatura. Habitualmente, a capacidade nominal da

bateria é definida para um regime de descarga de 10 horas com corrente constante, à temperatura de 25ºC, até à tensão final de 1,75V por célula ou de 10,5V por bateria (12V nominal) [40].

Teoricamente e como exemplo, uma bateria de 200Ah é capaz de proporcionar uma corrente de 20A durante 10 horas, ou 4A por 50 horas, ou ainda 1A por 200 horas [45].

A capacidade da bateria depende em muito do tempo de descarga, diminuindo, em relação à nominal, quando o tempo é muito pequeno, ou seja, quando a corrente de descarga é elevada. Por outro lado, a capacidade pode aumentar quando a corrente de descarga é pequena, onde, consequentemente o tempo de descarga é maior [37]. Quanto maior for a corrente de descarga menor será a autonomia e a capacidade da bateria, isto leva a um comportamento não linear da mesma. Dessa forma, não é correcto definir uma bateria de 100Ah, mas sim falar de uma bateria de 100Ah padrão de descarga de 20 horas, com uma tensão de corte de 10,5V.

O gráfico da Figura 3.12 mostra as curvas e os índices de descarga das baterias de ácido chumbo do fabricante Unipower, a uma temperatura constante de 25ºC [46]. A sigla *C* representa a capacidade nominal da bateria medida em 20 horas de descarga, com uma tensão de corte de 1,75V por célula.

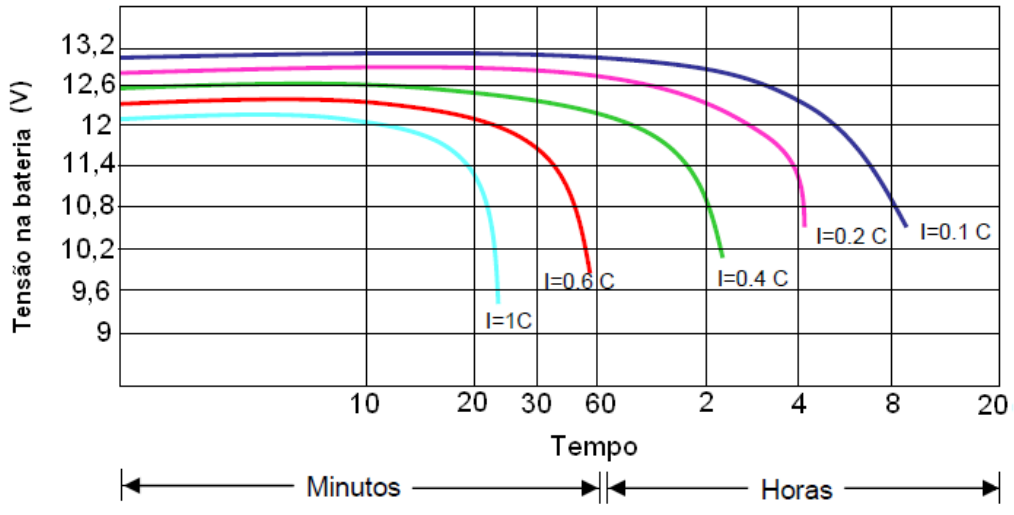


Figura 3.12 – Características das curvas de descarga para bateria de ácido chumbo, a diferentes valores de corrente de descarga a uma temperatura constante de 25ºC

A temperatura também influencia directamente a capacidade nominal da bateria. À medida que a temperatura ambiente diminui, a capacidade nominal da bateria também diminui e vice-versa. O gráfico da Figura 3.13 mostra para

as baterias ácido chumbo do fabricante Unipower [46], os efeitos da temperatura ambiente em relação à capacidade da bateria. Para cada corrente de descarga há uma curva. Essa corrente é dada como uma percentagem da capacidade da bateria (*C*) em Ah, no padrão de descarga de 20 horas.

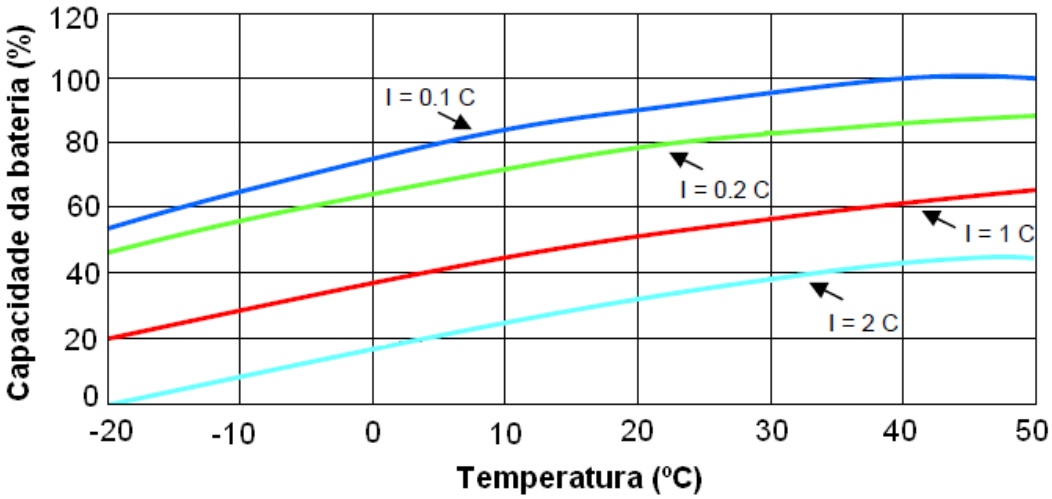


Figura 3.13 – Efeito da temperatura ambiente em relação à capacidade da bateria ácido chumbo, para diferentes valores de corrente de descarga

3.3.2.3. Profundidade de Descarga

Dependendo do tipo de aplicação para a qual a bateria de ácido chumbo for especificada, esta pode ser definida pelo número de ciclos que pode realizar [45]. Um processo de descarga seguido de um processo de carga que restaure por completo a capacidade da bateria é designado de ciclo [40]. Desta forma, a profundidade de descarga da bateria é um parâmetro importante na escolha da mesma. A profundidade de descarga, frequentemente referida por DOD (*Depth of Discharge*), é a quantidade de carga retirada da bateria num ciclo de funcionamento, expressa em percentagem da capacidade nominal desta [47]. Por exemplo, se forem retirados 25 Ah de uma bateria de capacidade nominal de 100 Ah origina numa profundidade de descarga de 25% [37].

A profundidade de descarga influencia directamente o número de ciclos de funcionamento da bateria. Assim, quanto menor for a profundidade de descarga maior é número de ciclos de funcionamento que a bateria realiza, dessa forma maior é a sua vida útil. As baterias de grande profundidade de descarga são as mais apropriadas para os sistemas fotovoltaicos de geração de energia eléctrica [45], sendo que para as baterias de ácido chumbo uma descarga muito profunda, que alcance níveis superiores aos pré-estabelecidos

para a sua profundidade de descarga, pode tornar o processo químico irreversível, o que impossibilita o recarregamento da bateria. Assim, para evitar descargas demasiado profundas acima dos valores permitidos em sistemas fotovoltaicos que utilizem baterias de ácido chumbo, os controladores de carga devem conter uma protecção que desliga a bateria das cargas por baixa tensão (LVD – *Load Voltage Disconnection*) [48]. Esta característica dos reguladores de carga é accionada quando a tensão da bateria alcança um valor V_{LDV}, que corresponde ao valor da tensão aceitável de descarga, pré-determinado previamente. O valor de tensão no qual a bateria volta a ser conectada à carga (LRV – *Load Reconnection Voltage*) é designado de V_{LRV} e também é pré-determinado antecipadamente. Este valor corresponde a um estado de carga seguro para a bateria voltar a fornecer energia.

Os sistemas fotovoltaicos devem ser projectados para que os reguladores de carga raramente accionem o controlo LVD, ou seja, apenas ligar em casos extremos de longos períodos de radiação solar reduzida.

Perante estes factos, carregar adequadamente as baterias de ácido chumbo, conforme as recomendações dos fabricantes aumenta a durabilidade das mesmas.

O gráfico da Figura 3.14, adaptado do manual técnico das baterias da Unipower [46], mostra a relação entre a profundidade de descarga e o número de ciclos que a bateria é capaz de realizar durante a sua vida útil.

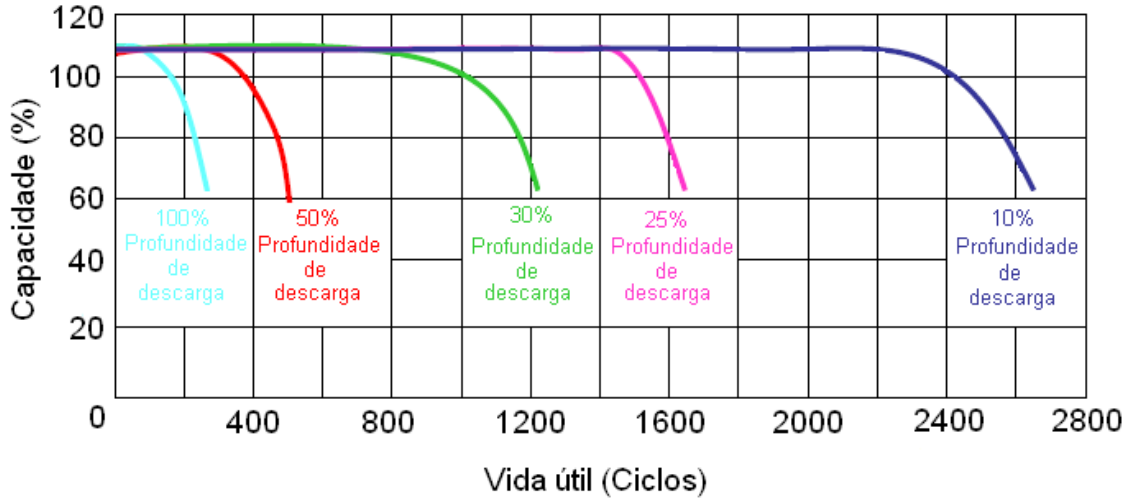


Figura 3.14 – Capacidade das baterias de ácido chumbo em função do número de ciclos de funcionamento, para diferentes percentagens de profundidade de descarga

A formação de cristais de sulfato de chumbo nas placas das células das baterias é chamada de sulfatação. Este fenómeno é outro problema

relacionado com o processo de descarga das baterias, que está relacionado com a degradação da bateria de ácido chumbo e consequentemente da sua vida útil. Evitar manter a bateria por longos períodos de tempo descarregada, assim como acautelar carregamentos parciais prolongados e precaver uma operação contínua em temperatura acima de 45ºC, são as principais precauções que devem ser tomadas para minimizar o problema relacionado com a sulfatação [49].

3.3.2.4. Estado de Carga

Na modelação das baterias um dos principais desafios é o conhecimento do seu estado de carga (SOC – *State of charge*) [50], pois o conhecimento deste parâmetro é importante para prevenir sobrecargas e descargas demasiado profundas, assim como é imprescindível para gerir a capacidade disponível.

Quando uma bateria permanece durante um bom período de tempo em repouso, isto é, sem ser descarregada nem recarregada, a tensão de circuito aberto é reveladora do estado de carga actual [37]. Desta forma, o gráfico da Figura 3.15, adaptado do manual técnico das baterias da Unipower [46], mostra que a tensão de circuito aberto e o estado de carga exibem um comportamento linear.

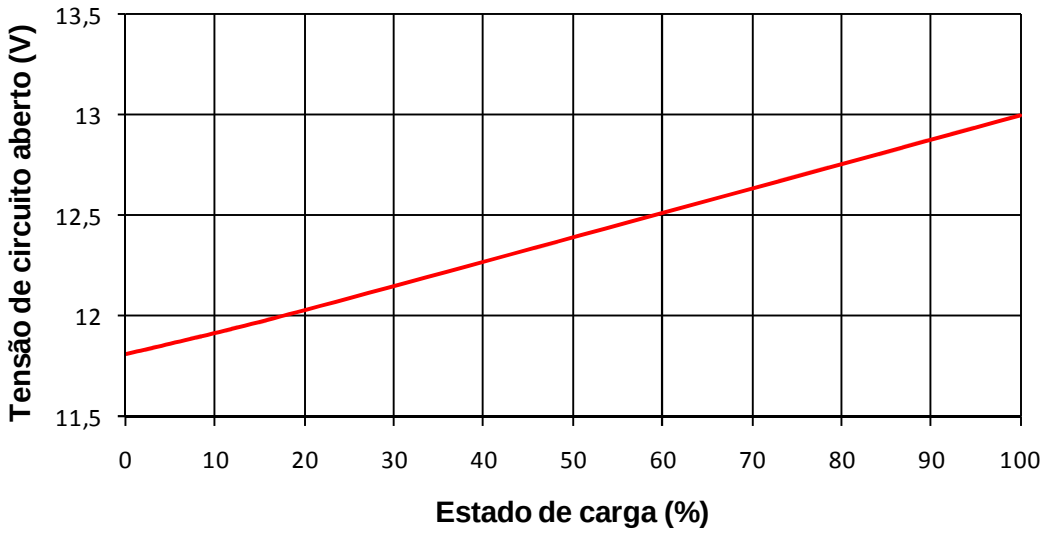


Figura 3.15 - Estado de carga e tensão de circuito aberto de uma bateria

Como referido anteriormente, o comportamento das baterias não é linear e varia também pelo seu estado de carga. O estado de carga é complementar

ao valor da profundidade de descarga, ou seja, é a capacidade disponível numa bateria, expressa como percentagem da capacidade nominal da mesma. Assim, e tomando como exemplo, se forem retirados 20Ah de uma bateria de capacidade nominal 100Ah, o novo estado de carga é de 80%.

3.3.2.5. Processo de Carga

Devido à geração não linear de energia pelos painéis, as baterias empregues nos sistemas fotovoltaicos estão sujeitas às mais diversas condições operacionais, desta forma os processos de carga para aplicações fotovoltaicas são de controlo complicado devido essencialmente à variação sistemática da intensidade da radiação solar. Portanto, os principais problemas passam por cargas e descargas irregulares, devido à variação da radiação solar durante o dia, a descargas com corrente de baixa intensidade e cargas escassas, em virtude da ausência de sol por vários dias. Assim, o controlador de carga é o equipamento responsável pela monitorização do processo de carga e descarga da bateria, dentro de limites pré-estabelecidos pelos fabricantes. Este tipo de controlo permite um melhor aproveitamento da energia gerada pelo painel fotovoltaico, além de garantir a protecção da bateria, aumentando assim o seu ciclo de vida.

Como analisado anteriormente neste capítulo esta dissertação é projectada para um sistema fotovoltaico que optimiza a extracção de energia produzida através de um circuito que faz com que os painéis operem no ponto de máxima potência. O carregamento das baterias através do circuito MPPT geralmente utiliza o método dos 3 estágios (método dos 3 ciclos de carga) [51]. Numa primeira fase, estágio 1, quando a bateria se encontra completamente descarregada esta atinge um valor limite de tensão. Nesta condição a bateria é carregada com uma corrente constante até se obter um certo valor máximo de tensão de sobrecarga, que depende das características das baterias. Geralmente o valor da corrente de carga não deve ser elevado para não provocar sobreaquecimento e desgaste prematuro da bateria. No 2º estágio, carregar as baterias com um valor de tensão fixa, até que a corrente de carregamento atinja um certo valor. Este valor de corrente é reduzido e ronda o 1% da capacidade nominal da bateria [37]. Finalmente, numa terceira fase, aplicar uma tensão constante, um pouco inferior à do estágio 2. Esta tensão deve aplicar-se durante um intervalo de tempo até se estabilizar as reacções

químicas das baterias. Estas três fases são representadas na Figura 3.16. Esta figura mostra as curvas de corrente e tensão sobre a bateria durante o processo de carga. Aplicando o método dos 3 ciclos de carga para o carregamento das baterias leva a uma optimização dos seus tempos de vida útil [51].

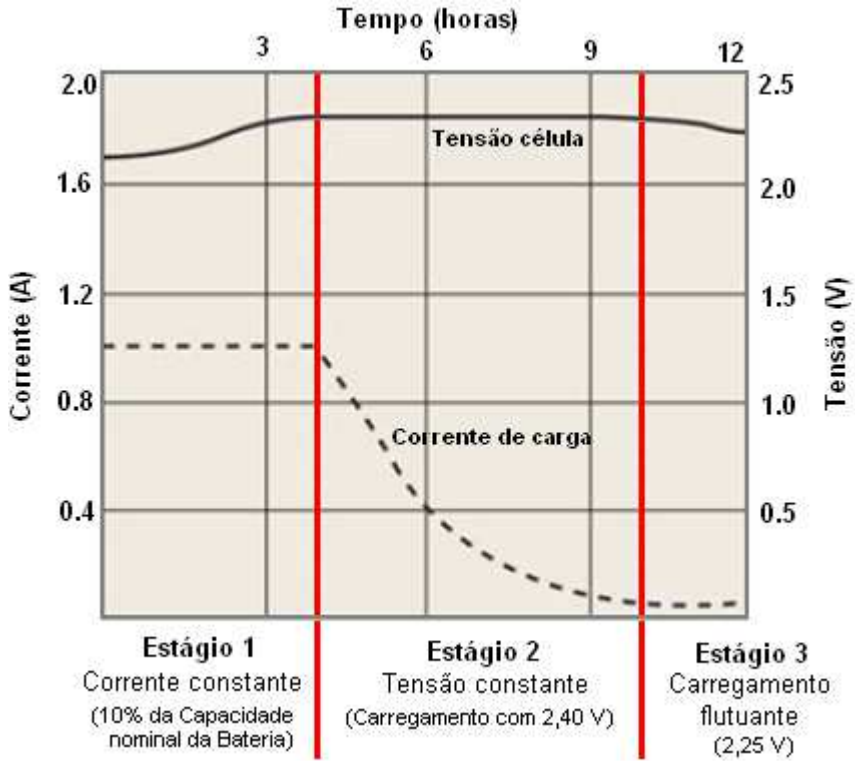


Figura 3.16 – Curvas de corrente e tensão (por célula) nos 3 estágios do processo de carga de baterias de ácido chumbo

3.3.3. Modelos de Baterias

Devido às suas reacções químicas as baterias tem um comportamento não linear e são influenciadas por diversos factores, tais como a temperatura de operação, o estado de carga e aspectos relacionados com a sua construção, entre outros. Desta maneira, os modelos eléctricos e matemáticos que descrevam o comportamento dinâmico das baterias não são fáceis de desenvolver com precisão [37]. Assim, para a simulação da bateria, posteriormente apresentada nesta dissertação, foi utilizado o modelo genérico para baterias recarregáveis de ácido chumbo disponível no pacote Power Systems do Simulink. A Figura 3.17 mostra o modelo utilizado para a simulação da bateria e respectivo bloco de parâmetros do sistema fotovoltaico implementado. Os parâmetros delineados para a bateria foram de 12V de tensão nominal, 7.2Ah de capacidade nominal e foi escolhido um estado de carga (SOC) inicial de 50%.

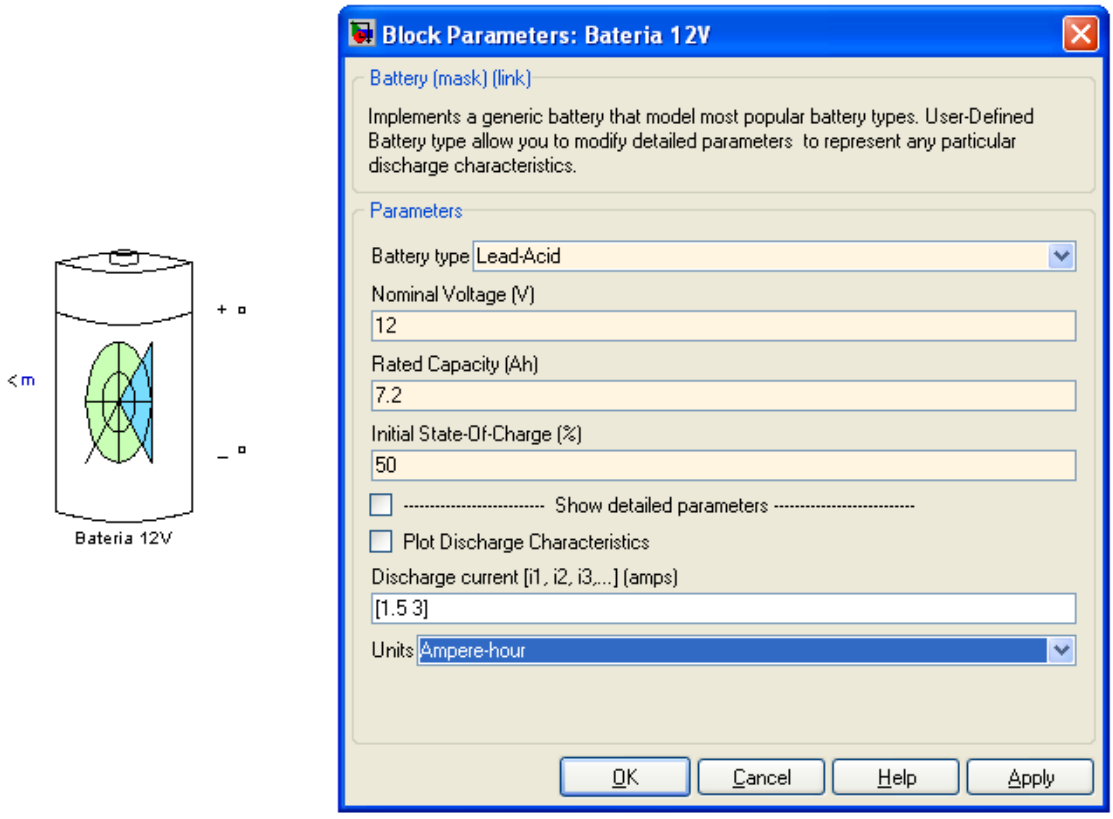


Figura 3.17 – Modelo de bateria e respectivo bloco de parâmetros utilizados para a simulação do sistema de armazenamento do sistema fotovoltaico

Contudo, em vários trabalhos relacionados com esta temática, diversos modelos para a simulação de baterias são propostos. Desta forma, segue-se uma breve descrição dos vários modelos de baterias, baseados em componentes eléctricos. Estes modelos variam conforme o grau de complexidade e das propriedades em estudo na simulação [23]. O modelo mais simples é proposto em [52] e é constituído apenas por uma resistência R_{ib}, que caracteriza a resistência interna da bateria, em série com uma fonte de tensão ideal V_{OB}, que representa a tensão de circuito aberto. Este modelo é mostrado na Figura 3.18 (a) e manifesta demasiada simplicidade para a maioria das aplicações, pois não permite analisar fenómenos específicos das baterias, tais como a capacidade de carga e descarga.

Outro modelo, mostrado na Figura 3.18 (b) e proposto em [53], apresenta uma aproximação de primeira ordem da bateria. Este modelo exibe uma tensão de circuito aberto ideal, definida em relação ao estado de carga (SOC) da bateria [23]. A resistência R_{ib} exprime a resistência interna da bateria, enquanto o condensador C_b representa a capacidade de carga da mesma. A inclusão da malha RC permite representar os fenómenos transitórios na carga e na descarga o que confere uma maior precisão ao modelo. Contudo, como o

funcionamento da bateria depende do ponto de funcionamento, é necessário determinar C_b e R_{Pb} em função da corrente de carga, do SOC e da temperatura. Em função disto é necessário efectuar vários testes de carga e descarga em diferentes condições de funcionamento o que torna o processo implícito a este modelo num procedimento moroso. Outro problema associado a este modelo é o facto de não garantir a validade dos valores obtidos durante todo tempo de vida útil da bateria.

Para uma modelação mais apropriada, deve analisar-se o circuito equivalente de Thévenin de uma bateria. Este modelo, exibido na Figura 3.18 (c), permite estudar o comportamento da tensão em baterias durante o ciclo de vida útil da mesma [54], ao contrário do que sucede com o modelo anteriormente mencionado. As grandezas eléctricas que compõem este circuito são a tensão de circuito aberto V_{OB}, a resistência interna da bateria R_{ib} e a tensão em sobretensão, dada pela combinação em paralelo da resistência R_{Pb} e do condensador C_b. O circuito equivalente de Thévenin possibilita averiguar quais os principais elementos que condicionam o funcionamento das baterias, contudo, a utilização deste método em simulação causa resultados pouco válidos visto que realiza uma aproximação imperfeita dos diferentes parâmetros, pois considera-os constantes quando na realidade dependem do estado de carga, da capacidade de armazenamento, da taxa de carga e descarga da bateria e da temperatura ambiente [37].

Por fim, outro modelo mostrado na Figura 3.18 (d) e proposto em [52] apresenta díodos que possibilitam reconhecer os componentes associados à carga e descarga da bateria. Outros componentes associados a este modelo, como os que compõe V_{c1} representam as sobretensões, as resistências R_{SC} e R_{SD} a resistência interna e R_{Pb} a resistência associada à autodescarga da bateria. O condensador C_b, tal como em outros modelos, simula a capacidade da bateria. Apesar de este modelo manifestar resultados satisfatórios é necessário a realização de vários testes físicos à bateria em estudo para se estimar o valor dos vários parâmetros.

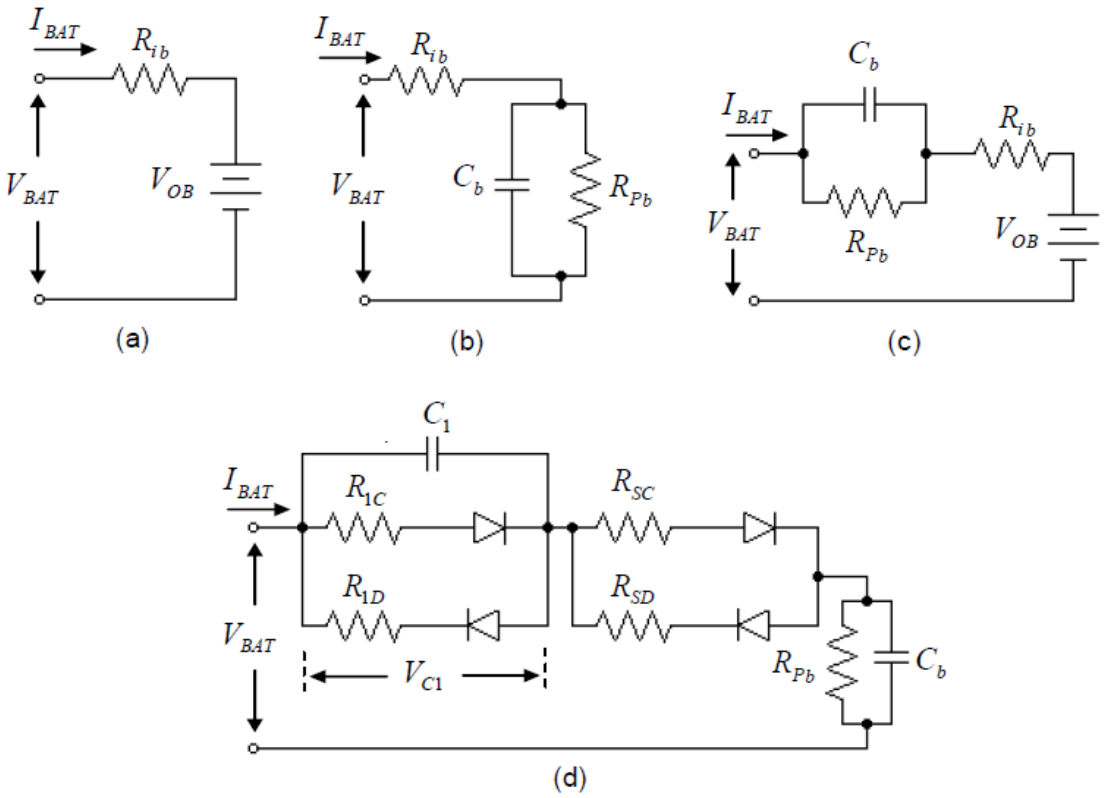


Figura 3.18 – Circuitos eléctricos equivalentes de uma bateria: (a) Modelo simplificado; (b) Modelo equivalente de primeira ordem; (c) Modelo Thévenin; (d) Modelo de carga e descarga [37]

3.4. Conversor CC-CC

Os conversores estáticos têm como finalidade ajustar a potência eléctrica disponível em determinados pontos do sistema para uma outra forma estável desejada. Com uma estratégia de controlo para a abertura e fecho dos seus semicondutores de potência os conversores estáticos são capazes de elevar ou abaixar um determinado nível de tensão ou corrente contínua, transformar uma tensão alternada em contínua ou uma tensão contínua em alternada com amplitude e frequência desejadas. Estes conversores são utilizados em muitas aplicações, como são exemplo disso as fontes de alimentação CC, UPS's, aplicações para motores CC, sistemas fotovoltaicos, etc.

Os conversores estáticos podem operar no modo tensão ou no modo corrente. No modo tensão a variável de controlo é a tensão de saída e o conversor funciona como uma fonte de tensão. No modo de corrente a variável de controlo é a corrente de saída e o conversor opera como uma fonte de corrente equivalente [40].

Nos sistemas fotovoltaicos utilizam-se tipicamente dois tipos de

conversores estáticos: os conversores CC-CC e os conversores CC-CA. Como este trabalho apenas considera a potência proveniente do painel fotovoltaico para o carregamento de uma bateria, serão apresentadas unicamente considerações sobre os conversores CC-CC.

3.4.1. Topologias de Conversores CC-CC

Os conversores comutados de corrente contínua são circuitos electrónicos não lineares que são essencialmente compostos por semicondutores de potência funcionando como interruptores, e por elementos passivos que armazenam temporariamente a energia transferida entre a fonte de entrada e a carga. Tipicamente, os conversores são utilizados para fornecer tensões contínuas reguladas a partir de uma fonte de tensão contínua não regulada.

As topologias dos conversores CC-CC diferenciam-se pelo modo como estes elementos estão ligados entre si. Existem três topologias básicas de conversores CC-CC que são: conversor abaixador de tensão, conhecido como *Step-down* ou *Buck,* conversor elevador de tensão, denominado como *Step-up* ou *Boost* e o conversor abaixador-elevador, designado como *Buck-boost.* A Figura 3.19 (a) ilustra a topologia de um conversor *Step-down*, a Figura 3.19 (b) mostra a topologia de um conversor *Step-up* enquanto a Figura 3.19 (c) exibe a topologia de um conversor *Buck-boost*.

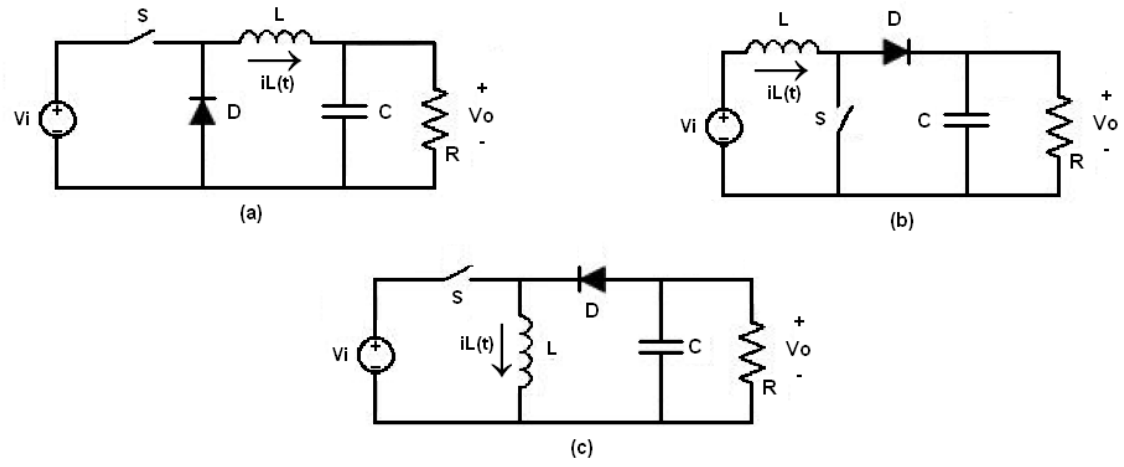


Figura 3.19 - Topologias básicas dos conversores CC-CC: (a) Step-down, (b) Step-up e (c) Buck-boost

Nas figuras anteriores S representa o semicondutor de potência que funciona como interruptor, L é uma bobina para o armazenamento de energia, C é um condensador que actua como filtro de saída, D é um díodo, iL(t) é a corrente que atravessa a bobina, Vi é a tensão de entrada e Vo a tensão de saída aos terminais da carga R.

Conforme a corrente iL(t) que percorre a bobina admite-se dois modos de operação dos conversores CC-CC: modo de condução contínua, onde a corrente iL(t) é sempre maior que zero durante um período de funcionamento; e o modo de condução descontínua onde a corrente iL(t) é zero durante alguns momentos no período de funcionamento.

Os conversores estáticos CC-CC num sistema fotovoltaico fazem a ligação dos painéis solares ao barramento CC onde serão ligadas as cargas de corrente contínua. Nos sistemas fotovoltaicos autónomos essas cargas são normalmente armazenadoras de energia, mais concretamente bancos de baterias.

Estes conversores num sistema fotovoltaico podem exercer dupla função, uma é adequar o nível de tensão gerado nos terminais do painel fotovoltaico no nível de tensão desejado no barramento CC, possibilitando dessa forma definir a tensão dos equipamentos que serão ligados ao barramento CC. A outra função é a de seguidor do ponto de máxima potência do painel, designado pela sigla MPPT, como visto anteriormente.

3.4.2. Escolha da Topologia

O sistema fotovoltaico dimensionado realiza o trânsito da energia gerada num único sentido: do painel fotovoltaico para a bateria, e com base nas características do arranjo fotovoltaico escolhido e da faixa de operação da tensão na bateria, as topologias de conversores CC-CC mais apropriadas para este sistema são o conversor *step-down* e o conversor *buck-boost* (que possibilita baixar e aumentar a tensão de saída relativamente à entrada) visto que a tensão de máxima potência do arranjo fotovoltaico é maior que a tensão de operação do sistema para variadas radiações solares incidentes possíveis, como mostra a Figura 3.20. Nesta figura a faixa amarela indica a região de funcionamento normal da bateria.

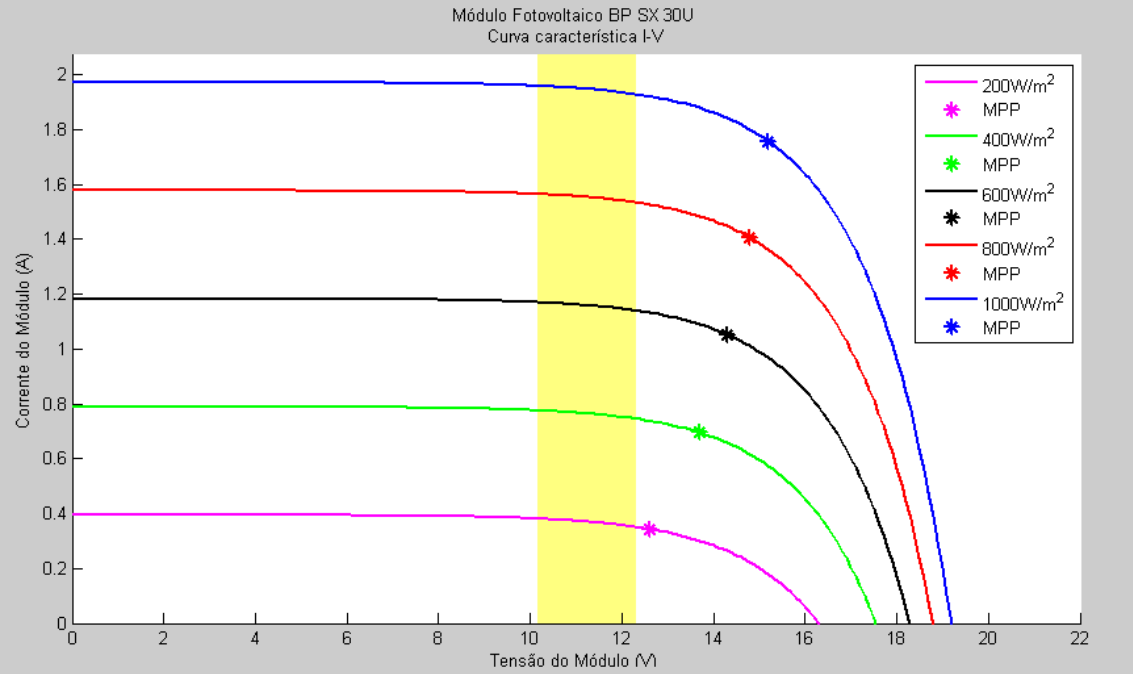


Figura 3.20 – Curva característica I-V do painel fotovoltaico a diferentes radiações solares incidentes a temperatura constante de 50ºC e faixa da região de funcionamento normal da bateria de ácido chumbo de 12V nominal

Atendendo às características do conversor *step-down* e do *buck-boost*, e sob o ponto de vista da facilidade de implementação, o *step-down* seria o mais aconselhável, visto que o conversor *buck-boost* inverte a tensão de saída e assim leva a um esquema de ligações mais complexo de analisar e de implementar [55]. Desta forma, a escolha por um conversor CC-CC da topologia *step-down* revela-se, para o caso em estudo, o mais apropriado.

3.4.3. Conversor CC-CC *Step-Down*

Como o próprio nome indica, o conversor CC-CC *step-down,* também denominado por conversor *buck,* produz uma tensão de saída média menor que a tensão de entrada V_i, mantendo a mesma polaridade. O circuito da Figura 3.21 representa um conversor *step-down* para uma carga puramente resistiva. Este é constituído por um semicondutor de potência (S), um díodo (D), uma bobina (L), um condensador (C) e por uma resistência (R) que representa a carga.

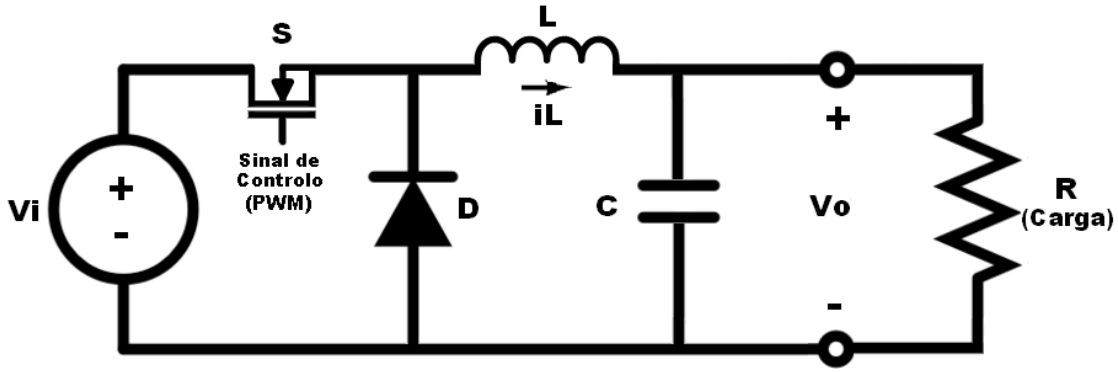


Figura 3.21 - Circuito eléctrico de um conversor step-down para uma carga puramente resistiva

Numa análise mais detalhada, o conjunto da bobina L com o condensador C apresenta um filtro passa-baixo. A frequência de corte deste filtro deve ser muito menor do que a frequência de comutação do semicondutor de potência, permitindo desta forma diminuir a ondulação da saída.

Este conversor assenta o seu funcionamento no armazenamento e descarga de energia na bobina L, comportamento este que passa por controlar os períodos de condução e de não condução do semicondutor de potência S, considerando-o como interruptor ideal, controlando assim o *duty-cycle* do sinal PWM aplicado ao mesmo. Desta forma, podem identificar-se dois estados distintos quanto ao funcionamento do conversor *step-down*: um relativo ao período de condução do semicondutor de potência, t_{ON}, e outro correspondente ao estado de não condução do semicondutor, t_{OFF}. Os circuitos da Figura 3.22 (a) e (b) representam respectivamente cada um dos estados descritos. De notar que o circuito do conversor *step-down* está completo, contudo cada estado de funcionamento do conversor só considera a parte do circuito que se encontra a vermelho.

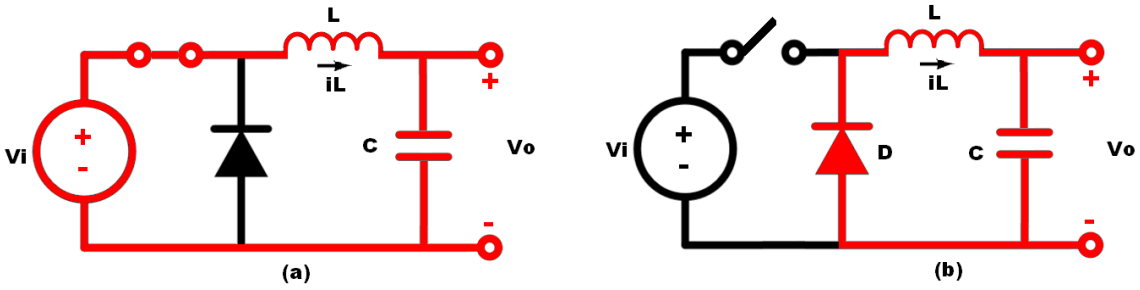


Figura 3.22 – Conversor step-down nos dois estados de funcionamento: (a) perído de condução do semicondutor de potência; (b) período de não condução do semicondutor de potência

Com o semicondutor de potência em condução (Figura 3.22 (a)), período t_{ON}, a corrente circula pela bobina L, crescendo i_L, e pelo condensador C quando $i_L > V_o/R$ (R é a resistência da carga na saída). Durante este período a bobina armazena energia e o díodo D encontra-se inversamente polarizado não influenciando o circuito. Quando o semicondutor de potência não está em condução (Figura 3.22 (b)), período t_{OFF}, o díodo D começa a conduzir dando continuidade à corrente i_L na bobina. A energia armazenada na bobina é transferida para o condensador C e para a carga (saída). Enquanto o valor da corrente i_L for maior do que a corrente na carga, a diferença carrega o condensador C. Pelo contrário, enquanto a corrente i_L for menor que a corrente na carga, o condensador descarrega-se com o intuito de manter constante a corrente na carga.

A Figura 3.23 mostra as formas de onda do conversor *step-down* no modo de condução contínua, em que a corrente que atravessa a bobina L flui continuamente e nunca se anula ($I_L(t) > 0$).

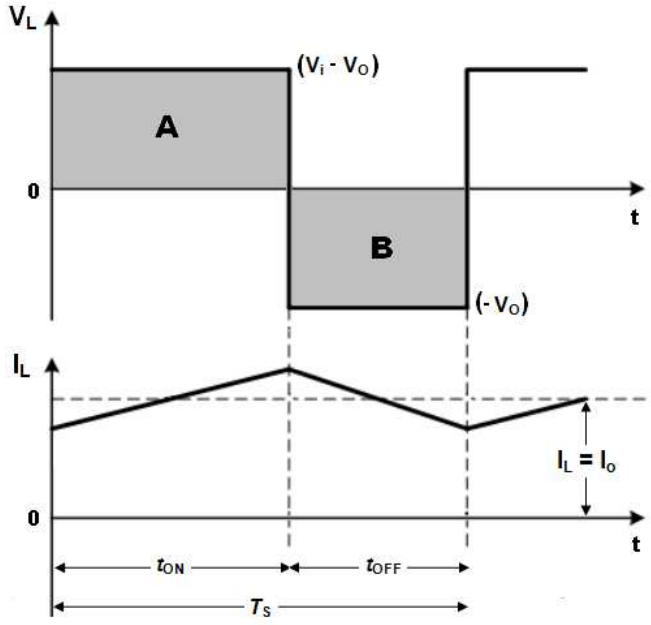


Figura 3.23 – Formas de onda da tensão e corrente na bobina do conversor *step-down* em modo de condução contínua

Caso a corrente na bobina atinja o valor 0 diz-se que o conversor está em modo de condução descontínuo. O modo de condução contínuo é bastante importante e muito utilizado, pois, perante este facto, existe uma relação entre o *duty-cycle* (d) e a tensão média de saída (V_o).

Quando o interruptor está ligado durante um período de duração t_{ON},

resulta numa tensão positiva $V_L = V_i - V_o$ através da bobina L, como se verifica pela Figura 3.22 (a). Porém, quando o interruptor é desligado a corrente i_L continua a fluir, devido ao armazenamento de energia na bobina. Esta corrente flui através do díodo D, e $V_L = -V_o$ [55] [56].

Em regime permanente, as formas de onda devem repetir-se pelos períodos de tempo seguintes. O integral da tensão V_L na bobina durante um período de tempo T_S deve ser zero (equação (3.8)) [55].

$$\int_0^{T_S} v_L\, dt = \int_0^{t_{ON}} v_L\, dt + \int_{t_{ON}}^{T_S} v_L\, dt = 0 \tag{3.8}$$

Analisando a Figura 3.23, a equação (3.8) implica que as áreas A e B devem ser iguais. Desta forma surge a equação (3.9).

$$(V_i - V_o)\, t_{ON} = V_o\, (T_s - t_{ON}) \tag{3.9}$$

Ou,

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{t_{ON}}{T_S} = d \quad (duty\ cycle) \tag{3.10}$$

Portanto, no modo de condução contínua, o conversor CC-CC *step-down* é equivalente a um transformador de CC, onde a relação de espiras deste transformador equivalente pode ser controlado electronicamente através do *duty-cycle* do semicondutor de potência [55].

Assim, como o *duty-cycle* (d) assume valores entre 0 e 1, pode concluir-se que $V_i \geq V_o$, verificando-se assim o propósito deste conversor, ou seja, apresentar à saída uma tensão inferior à de entrada.

3.4.3.1. Controlo do *Step-Down* com PWM

O conversor *step-down* tem como objectivo controlar a tensão de saída (V_o), de modo a que essa tensão atinja um valor pretendido (V_{ref}). O processo empregue para efectuar este tipo de controlo é designado por PWM (*Pulse-With Modulation*), conhecido também como Modulação por Largura de Impulso. Com este tipo de controlo, o semicondutor de potência (S) é sujeito a sucessivas comutações entre dois níveis de tensão que controlam o valor do

duty-cycle, controlando desta forma os tempos em que o semicondutor está ligado ou desligado. A Figura 3.24 ilustra os blocos e variáveis imprescindíveis para efectuar o controlo do *step-down* com base no PWM.

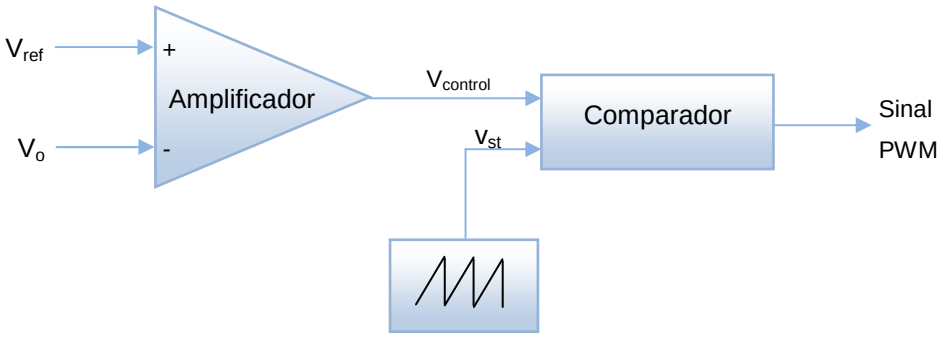


Figura 3.24 – Blocos e variáveis para controlo do *step-down* com PWM

Como referido anteriormente, V_o representa a tensão de saída do conversor *step-down* e V_{ref} caracteriza o valor da tensão que se deseja ter à saída. Este tipo de controlo inicia-se com a subtracção do valor de V_o com o valor de $V_{ref,}$ como se verifica no primeiro bloco da Figura 3.24, gerando um sinal de erro, designado por $V_{control}$. De seguida, este sinal é comparado com uma forma de onda v_{st}, que pode ser do tipo dente de serra (*sawtooth wave*) ou triangular (*triangle wave*). Esta forma de onda é gerada a uma frequência fixa (f_s), com período de valor $T_{s.}$ Geralmente, o valor máximo desta forma de onda corresponde ao valor da tensão $V_{ref.}$ A Figura 3.25 ilustra o processo de comparação entre $V_{control}$ e v_{st} que resulta na comutação de dois níveis de tensão que ligam e desligam o semicondutor de potência.

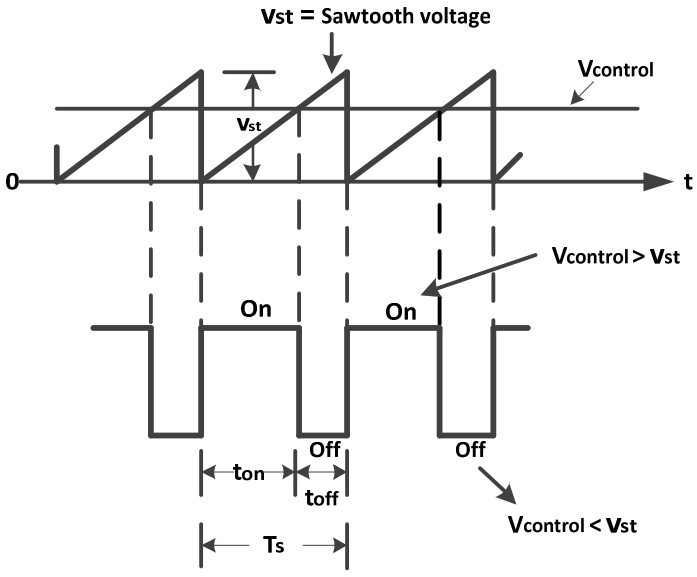


Figura 3.25 – Comparação dos sinais $V_{control}$ e v_{st} [55]

Assim que o valor da tensão $V_{control}$ é superior ao valor de v_{st}, o semicondutor está ligado, no estado t_{ON}. Por outro lado, se o valor de $V_{control}$ for menor que o valor de v_{st}, o semicondutor está desligado, no estado t_{OFF}. O valor do *duty-cycle* é calculado com base na equação (3.11) [55].

$$d = \frac{t_{ON}}{T_s} = \frac{V_{control}}{v_{st}} \tag{3.11}$$

Analisando a equação (3.11) conclui-se que o semicondutor deve estar mais tempo ligado quando o valor da tensão de saída (V_o) se encontra mais distante do valor da tensão de referência (V_{ref}). Desta forma, quando o valor de V_o está mais próximo do valor de V_{ref} o semicondutor deve estar mais tempo desligado. A Figura 3.26 apresenta o esquema do circuito *step-down* com o controlo PWM.

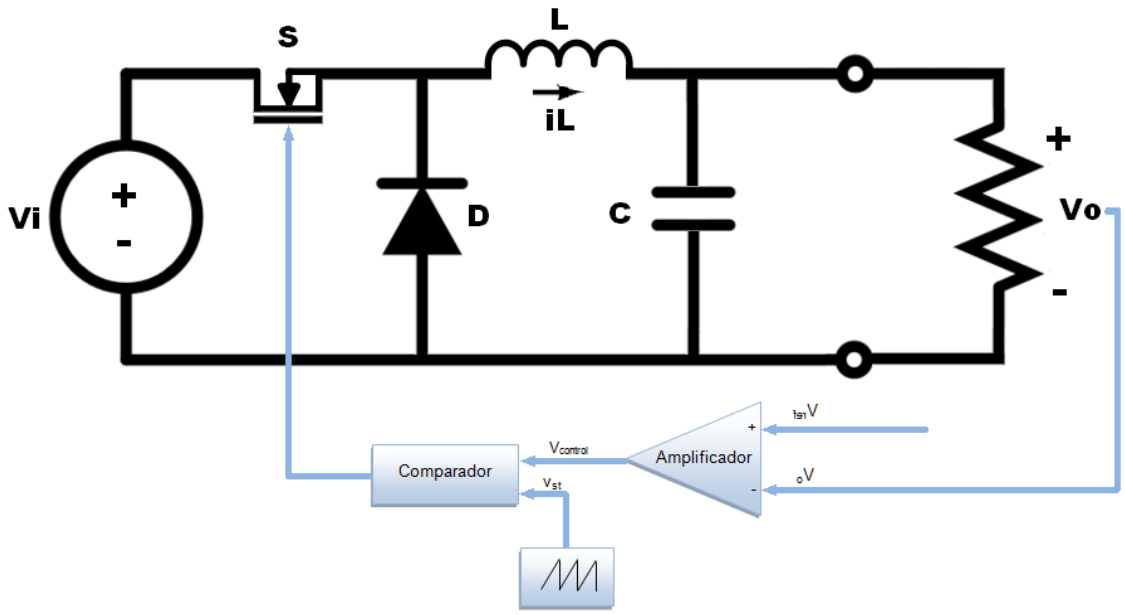


Figura 3.26 – Circuito eléctrico do conversor *step-down* com controlo PWM

3.4.3.2. Dimensionamento do Conversor *Step-Down*

Um conversor CC-CC *Step-Down* ideal em funcionamento no modo de condução contínua tem a relação (3.12) entre a tensão média de entrada V_i, e a saída V_o em regime permanente [55].

$$V_o = d\, V_i \tag{3.12}$$

A condição mais crítica sofrida pelo conjunto painel solar – bateria acontece quando no mesmo instante existe máxima insolação sobre o painel (G=1000 W/m^2) e a bateria está completamente descarregada. Desta forma, todos os cálculos para o dimensionamento dos componentes que compõem o conversor *step-down* têm como base esta premissa. A Figura 3.27 ilustra um sistema fotovoltaico composto por um painel fotovoltaico, um conversor *step-down* e uma bateria.

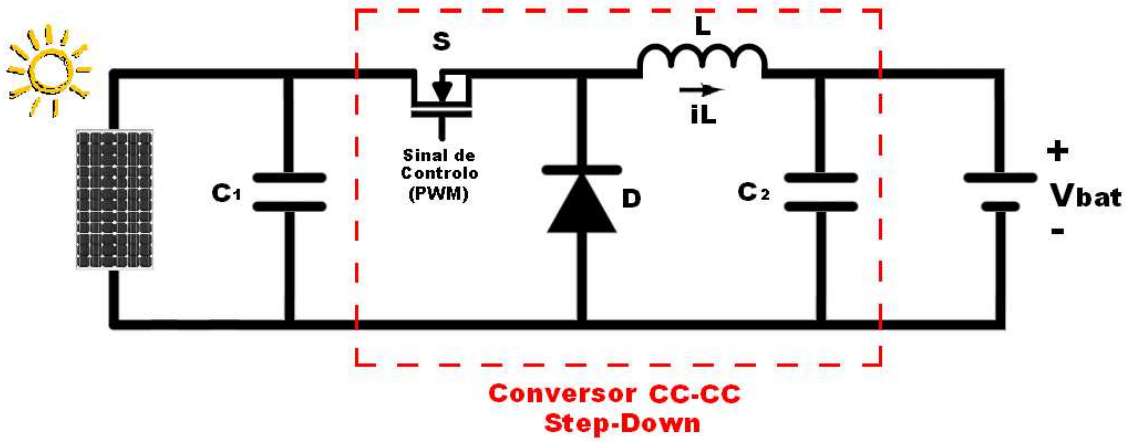


Figura 3.27 – Esquema eléctrico do sistema fotovoltaico implementado

As características do painel solar dimensionado para este sistema é de tensão de circuito aberto (V_{oc}) de 21V, e uma tensão de máxima potência (V_{mp}) de 16,8V. A bateria é considerada totalmente descarregada com uma tensão a rondar aproximadamente os 10,5V (V_{OFF}). Desta forma surge a equação (3.13) que representa o menor valor do *duty-cycle* (d) para o conjunto painel solar – bateria.

$$d_{min} = \frac{V_o}{V_i} = \frac{10{,}5}{16{,}8} = 0{,}625 \qquad (3.13)$$

Como referido anteriormente, as caracteristicas principais da bateria utilizada nesta dissertação são de 12V de tensão nominal e 7,2Ah de capacidade. Estas baterias podem ser carregadas sem controlo da temperatura desde que seja efectuada carga lenta [57]. A recomendação é carregar com uma corrente de 10% da capacidade total numa hora, ou seja, 0,72A. A caracteristicas gerais escolhidas para o sistema são de uma frequência de operação de 20kHz e de uma variação de corrente (ΔI) de 20% para a potência nominal.

Com base na equação (3.14) que traduz a tensão na bobina,

$$v = L\,\frac{di}{dt} \;\;\therefore\;\; v = L\,\frac{\Delta i}{\Delta t} \tag{3.14}$$

$$L = \frac{\Delta t}{\Delta i}\,v \tag{3.15}$$

e considerando os dados acima e as equações (3.16) (3.17) (3.18) calcula-se o valor da bobina (L) do circuito ilustrado na Figura 3.27.

$$\Delta i = 0{,}2\;I_L \tag{3.16}$$

$$v = V_i - V_o \tag{3.17}$$

$$\Delta t = t_{ON} \;\;\therefore\;\; \Delta t = d\,\frac{1}{f_s} \tag{3.18}$$

Substituindo as equações (3.16) (3.17) e (3.18) na equação (3.15) obtém-se a equação (3.19):

$$L = \frac{(16{,}8 - 10{,}5)\,.\,0{,}625\,.\left(\frac{1}{20000}\right)}{0{,}2\,.\;0{,}72} \;\;\therefore\;\; L = 1{,}37\;mH \tag{3.19}$$

O condensador C_1, em paralelo com o painel solar, permite a este operar com uma corrente estabilizada. Enquanto o MOSFET não está a conduzir a corrente do painel carrega o condensador. Já quando o MOSFET está a conduzir, o condensador fornece corrente que, juntamente à do painel, é igual à corrente que atravessa a bobina L [58]. Para calcular o valor deste condensador considera-se que ele é responsável por metade da corrente que irá percorrer o MOSFET, sendo neste caso 0,36A. Com base na equação (3.20) que define a corrente num condensador calcula-se o valor da capacidade do condensador C_1.

$$i_C = C\,\frac{dv}{dt} \quad \therefore \quad i_C = C\,\frac{\Delta v}{\Delta t} \tag{3.20}$$

Substituindo a equação (3.18) na equação (3.20) surge a equação (3.21) que permite calcular o valor de C_1.

$$C_1 = \frac{i_C \,.\, d}{f_s \,.\, \Delta v} \tag{3.21}$$

O valor mais elevado do *duty-cycle* (d) ocorre quando o painel solar fornece a tensão de máxima potência no valor 16,8V ao mesmo tempo que a bateria esteja completamente carregada com um valor de tensão igual a 14,4V. Assim,

$$d_{max} = \frac{V_o}{V_i} = \frac{14{,}4}{16{,}8} = 0{,}857 \tag{3.22}$$

Considerando admissível que existe uma variação da tensão de 2V no condensador e substituindo os valores acima descritos na equação (3.21) calcula-se o valor de C_1 (equação (3.23)).

$$C_1 = \frac{0{,}36 \,.\, 0{,}857}{20000 \,.\, 2} = 7{,}7\ uF \tag{3.23}$$

O condensador C_2, à saída do conversor, juntamente com a bobina L formam um filtro passa-baixo. Para o dimensionamento deste condensador utilizou-se a equação (3.24) [57].

$$C_2 = \frac{\Delta i_L}{2\pi \,.\, f_s \,.\, \Delta V_C} \tag{3.24}$$

Com base em [57] considerou-se $\Delta V_C = 0{,}025\ V_o$. Desta forma obtém-se o valor da capacidade do condensador C_2 na equação (3.25).

$$C_2 = \frac{0{,}2 \,.\, 0{,}72}{2\pi \,.\, 20000 .\, 0{,}025 \,.10{,}5} = 4{,}3\ uF \tag{3.25}$$

Mediante estes variados cálculos, a Tabela 3.4 apresenta resumidamente os valores dos componentes dimensionados para o esquema da Figura 3.27.

Tabela 3.4 – Valores dos componentes dimensionados para o conversor *Step-Down*

Componente	**Valor**
Bobina (L)	1,37 mH
Condensador de entrada (C_1)	7,7 uF
Condensador de saída (C_2)	4,3 uF

3.5. Conclusões

Neste capítulo abordaram-se os componentes essenciais para efectuar o interface entre o painel fotovoltaico e o barramento CC, composto por um conversor CC-CC *step-down* capaz de efectuar o rastreamento do MPP do painel solar fotovoltaico e de efectuar o controlo de carga e descarga de uma bateria de ácido chumbo.

Inicialmente foi apresentada uma análise detalhada das técnicas, usualmente mais utilizadas, de controlo a aplicar a sistemas fotovoltaicos de maneira a extrair a máxima potência proveniente dos módulos fotovoltaicos. Devido às características de funcionamento dos módulos fotovoltaicos, o ponto onde a potência máxima é gerada não é constante, variando com a temperatura e radiação solar incidentes no painel. Assim, para aumentar a eficiência do sistema e aproveitar ao máximo a energia gerada, o ponto de funcionamento deve ser constantemente analisado. Em [31] efectuou-se um estudo e concluiu-se que a inclusão de um sistema MPPT num sistema fotovoltaico aumenta a produção de energia eléctrica entre 20% a 40%, quando comparado com um sistema sem rastreamento do ponto de máxima potência. As técnicas apresentadas neste capítulo para rastrear o MPP foram: Tensão Constante (CV), Corrente de Curto-Circuito (SC), Condutância Incremental (IncCond) e Perturbação & Observação (P&O). Foi feita a descrição de todos os métodos referidos, apresentando-se os algoritmos para explicar o seu princípio de funcionamento de forma a realizar um estudo comparativo entre as várias técnicas para, posteriormente nesta dissertação, se efectuar a implementação, quer em simulações, quer experimentalmente. Apesar da facilidade de implementação, as técnicas CV e SC, apresentam um processo

de cálculo do valor de k complexo apresentando também baixa eficiência para além de outras desvantagens. Apresentado custos relativamente aceitáveis conjugado com a facilidade de implementação, a técnica de Perturbação e Observação, torna-se um método bastante utilizado no rastreamento do MPP. A eficiência desta técnica também traduz uma vantagem, embora se possa complicar o seu funcionamento quando as condições atmosféricas variam rapidamente. Elevada eficiência apresenta também a técnica de Condutância Incremental, que manifesta um funcionamento preciso e capaz de operar exactamente no ponto de máxima potência, ao contrário da técnica P&O. Contudo, quando comparado com as outras técnicas, torna-se bem mais complexa, o que representa maiores dificuldades na fase de implementação. Considerando todos os prós e contras das técnicas analisadas, nesta dissertação optou-se pela utilização do método P&O, pois esta técnica possibilita de forma satisfatória responder às exigências do trabalho.

Seguidamente, foi apresentado um estudo das principais características e tecnologias associadas às baterias recarregáveis, com vista a serem integradas em sistemas fotovoltaicos. Depois de uma breve comparação entre os diferentes tipos de baterias conclui-se que as baterias electroquímicas aproveitam melhor a energia gerada pelos painéis, recaindo a escolha numa bateria de ácido chumbo. Estas são, habitualmente, as mais utilizadas em sistemas fotovoltaicos, de maneira a armazenar a energia gerada em períodos de insolação para a utilizar à noite ou períodos com pouca radiação solar. A escolha deste tipo de baterias prevalece sobre outras devido ao seu baixo custo, quando comparadas com outro tipo de baterias electroquímicas. Para garantir que a bateria funcione em condições apropriadas, normalmente especificadas pelo fabricante, é essencial incorporar no sistema um controlador de carga. O tipo de controlo associado a este controlador de carga será posteriormente implementado e explicado no Capítulo 5. Foram também apresentados os circuitos eléctricos equivalentes mais utilizados na literatura, de forma a fazer uma modelação com vista à sua posterior utilização na simulação do sistema, apresentado no Capítulo 4.

Para finalizar este capítulo, apresentou-se um estudo comparativo das topologias de conversores CC-CC que melhor se adequam aos valores de corrente e tensão do sistema a implementar. Com base nas especificidades do painel fotovoltaico BP SX30U em conjunto com a faixa de operação da tensão numa bateria de 12V nominal, decidiu-se pela escolha de um conversor CC-CC

step-down, em detrimento de um *buck-boost* que também se poderia enquadrar nas necessidades do projecto. A preferência pelo *step-down* deveu-se essencialmente à maior facilidade de implementação prática. Depois da escolha do conversor CC-CC a utilizar foi feita uma exposição teórica do *step-down* e de como controlar a sua tensão de saída de forma a atingir um valor pretendido. O método de controlo usado para alterar o valor do *duty-cycle* a aplicar ao semicondutor do conversor foi o PWM, de forma a atingir os valores pretendidos tanto para o processo de carga e descarga da bateria como para o rastreamento do ponto de máxima potência do painel fotovoltaico. Foram ainda dimensionados os componentes que compõem o conversor *step-down* com base na condição mais crítica do conjunto painel solar-bateria, que acontece quando existe máxima radiação solar sobre o painel e a bateria está completamente descarregada.

CAPÍTULO 4

Simulações Computacionais

4.1. Introdução

Com uma inovação geral da tecnologia que representa uma diversificada montra de vantagens, acontece também que essa inovação poderá causar alguns problemas. Desta forma, parte destes inconvenientes traduzem-se na complexidade de equipamentos e sistemas, o que implica que circuitos eléctricos ganhem actualmente graus de dificuldade superiores. Com base nestes factos torna-se necessária a utilização de ferramentas de simulação para realizar estudos sobre o comportamento dos circuitos eléctricos que se pretendem implementar. Estes estudos permitem prever resultados de determinado circuito eléctrico antes da fase de desenvolvimento, precavendo o investigador de perigos associados ao mesmo. Com este tipo de ferramentas é possível ainda realizar um estudo do comportamento do sistema em condições extremas de funcionamento, ou seja, para além dos limites estabelecidos, alcançando uma percepção global do funcionamento e comportamento do sistema real permitindo ajustar e aperfeiçoar a eficiência deste, reduzindo assim os custos e o tempo dedicado para desenvolver um protótipo.

A realização dos módulos de simulação do sistema fotovoltaico desta dissertação foi realizada no Simulink do MATLAB. O Simulink é uma ferramenta utilizada para modelagem, simulação e análise de sistemas dinâmicos e disponibiliza ao utilizador uma interface gráfica amigável, representando o sistema por diagrama de blocos.

O SimPowerSystems é uma *toolbox* que opera no ambiente Simulink, dedicada à modelação de sistemas eléctricos, electromecânicos e de controlo. Através desta é possível simular e analisar sistemas de corrente contínua e alternada, apresentando vários blocos de componentes frequentemente utilizados, como é o caso de díodos, MOSFETs, IGBTs, cargas de vários tipos

(R, RL, RLC) e fontes de alimentação, entre outros.

O Simulink apesar de ser uma aplicação específica não trabalha independentemente do MATLAB.

4.2. Modelo de Simulação do Sistema

A Figura 4.1 mostra uma visão geral de todos os circuitos e componentes do sistema implementado na simulação. Neste subcapítulo serão mostrados e explicados os blocos e os passos utilizados na simulação do sistema efectuada no Simulink.

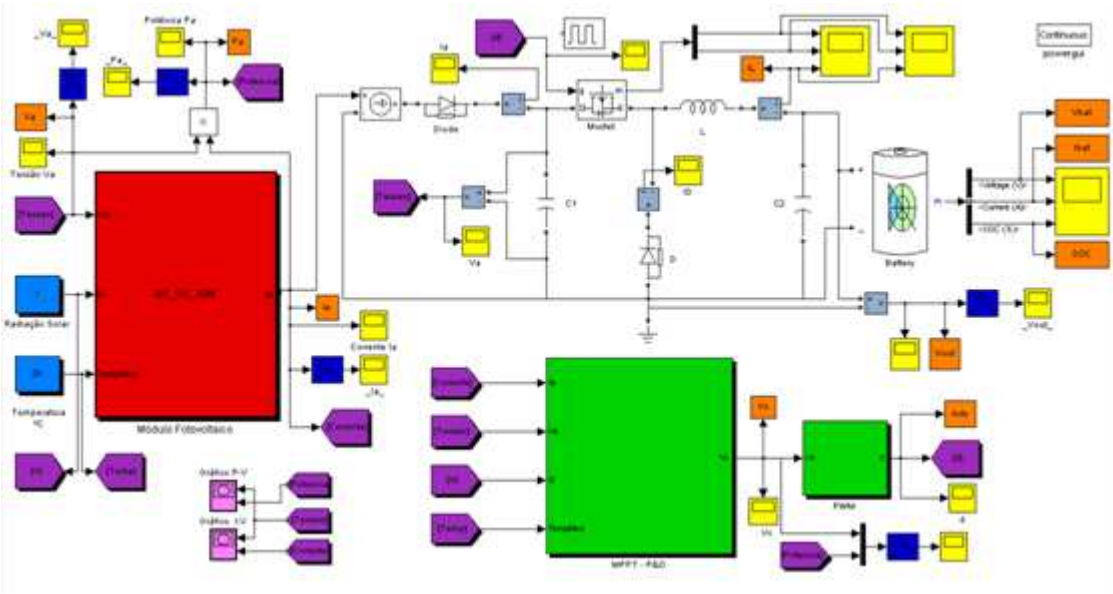


Figura 4.1 – Visão geral do sistema simulado no Simulink

Com base na modelação do módulo fotovoltaico BP SX30U efectuada no Capítulo 2, foi simulado o próprio utilizando um bloco programável (Embedded MATLAB Function). Neste bloco é empregue a função com a solução numérica da corrente gerada pelo painel fotovoltaico (Equação (2.21)). O circuito que simula o módulo fotovoltaico é mostrado na Figura 4.2. Este bloco para efeitos de cálculo tem como entradas o valor da temperatura e da radiação solar incidente no painel. Como saídas obtém-se a corrente e a tensão provenientes do painel solar fotovoltaico BP SX30U. O díodo garante que a corrente apenas circule no sentido painel solar - barramento CC, e não ao contrário. O díodo de bloqueio foi simulado como tendo uma queda de tensão de 0,7V e uma resistência de condução de 15mΩ. Com base nos cálculos efectuados para o dimensionamento do conversor *step-down*, no Capítulo 3, o condensador de saída do painel solar apresenta um valor de 10µF.

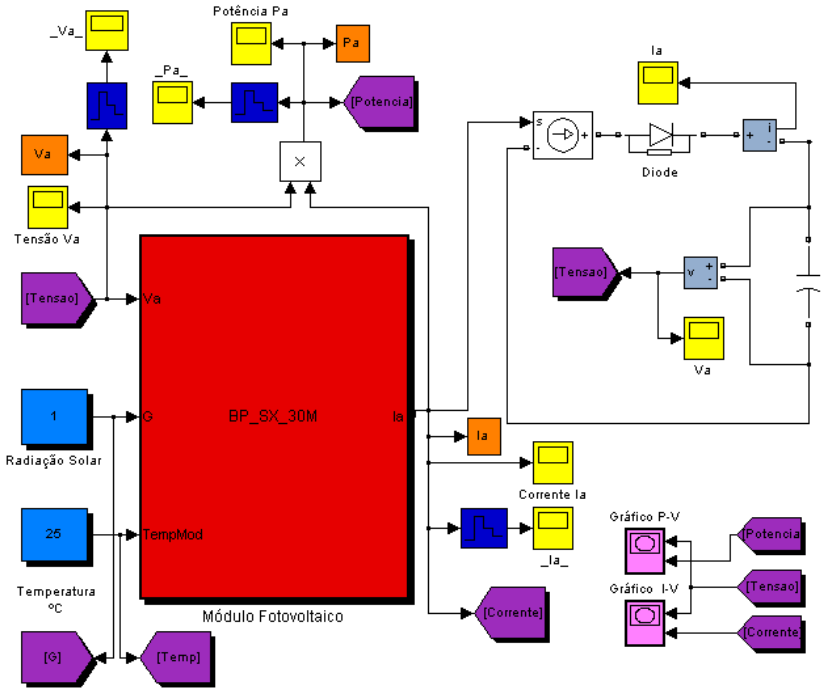
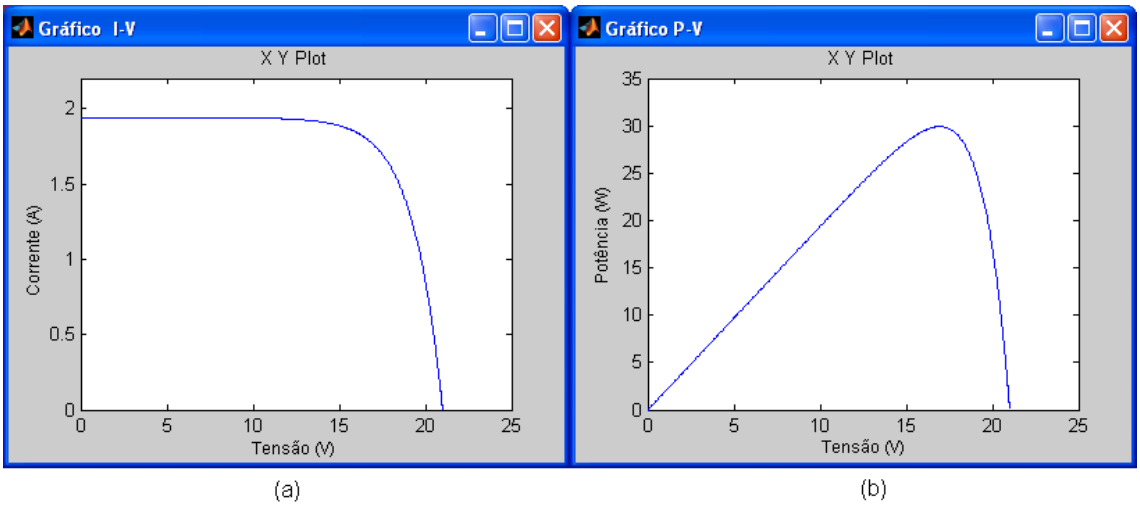


Figura 4.2 – Painel solar fotovoltaico BP SX30U implementado no Simulink

A Figura 4.3 apresenta as curvas características I-V e P-V resultantes da simulação do painel solar fotovoltaico BP SX30U com 1000 W/m^2 de radiação solar incidente a uma temperatura de 25ºC.



(a) (b)

Figura 4.3 – Curvas características do painel fotovoltaico BP SX30U (1000 W/m^2 e 25ºC): (a) curva característica I-V; (b) curva característica P-V

Como referido anteriormente, a corrente gerada pelo painel fotovoltaico é directamente dependente da intensidade da radiação solar. A Figura 4.4 mostra que com uma variação da radiação solar incidente no painel a corrente gerada sofre uma variação proporcional.

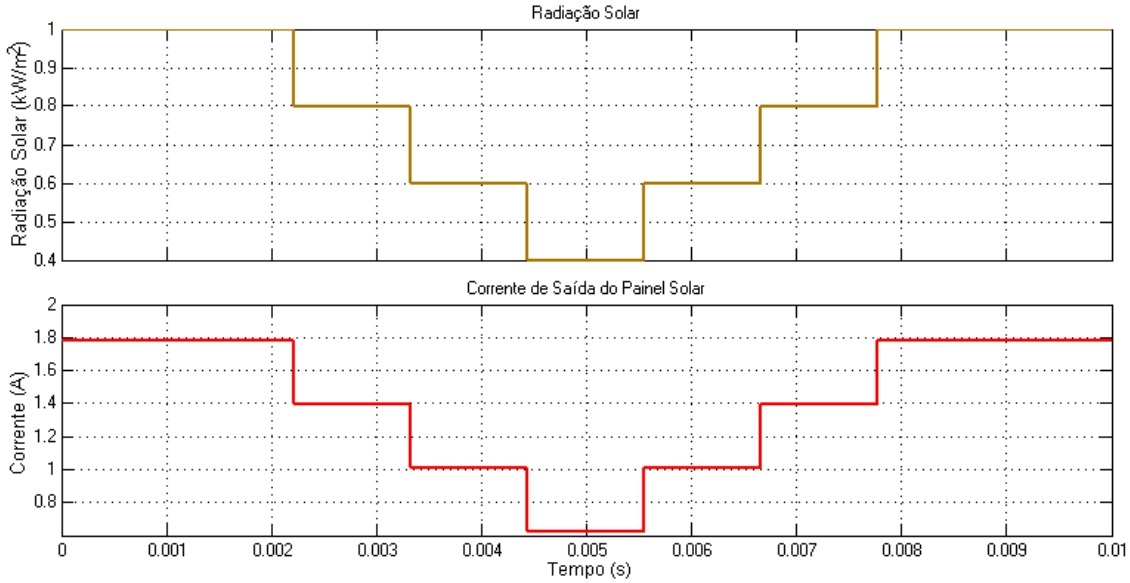


Figura 4.4 - Corrente gerada pelo painel fotovoltaico com variações da radiação solar

Para a simulação do conversor *step-down*, ilustrada na Figura 4.5, foram utilizados os valores dos componentes calculados no dimensionamento efectuado no Capítulo 3, ou seja, 7,7µF para o condensador de saída do painel fotovoltaico, 1,37mH para o valor da bobina e 4,3µF para o condensador de saída do conversor CC-CC *step-down*. Para o sinal de controlo PWM, a actuar em malha aberta, ou seja, sem o circuito MPPT em funcionamento, foi definido uma frequência de comutação de 20kHz.

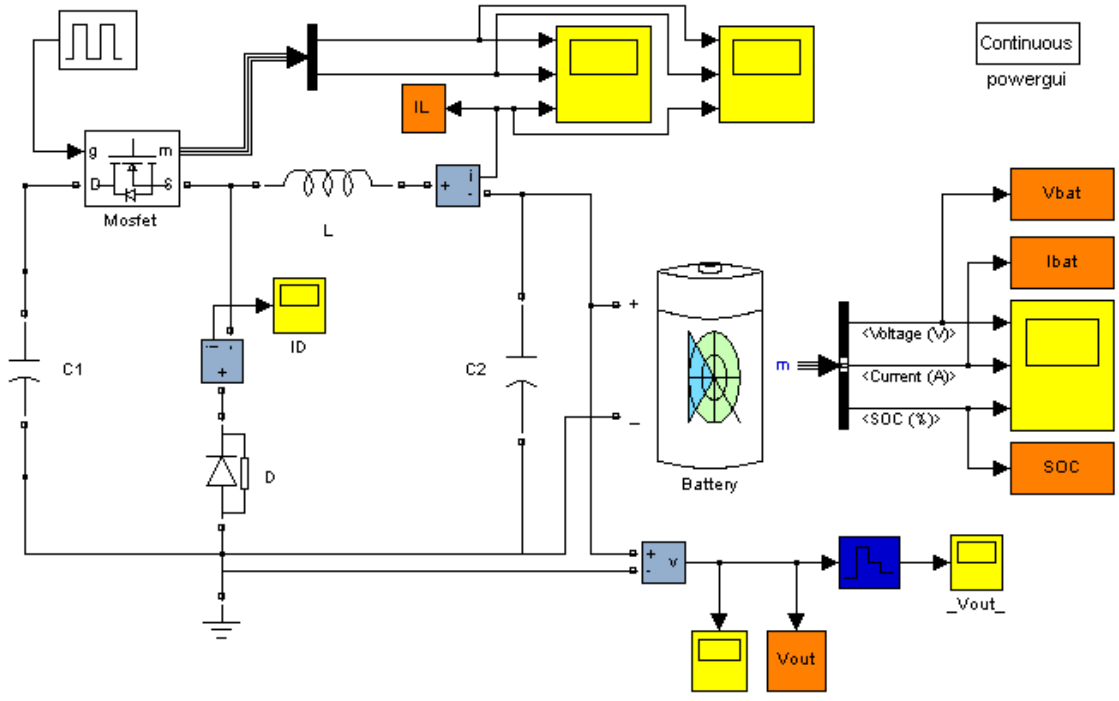


Figura 4.5 – Conversor *step-down* implementado para a simulação no Simulink

A Figura 4.6 apresenta as formas de onda da tensão de entrada, com a tensão de máxima potência do painel fotovoltaico (16,8V), e a tensão de saída do conversor *step-down* com uma carga resistiva de 100Ω.

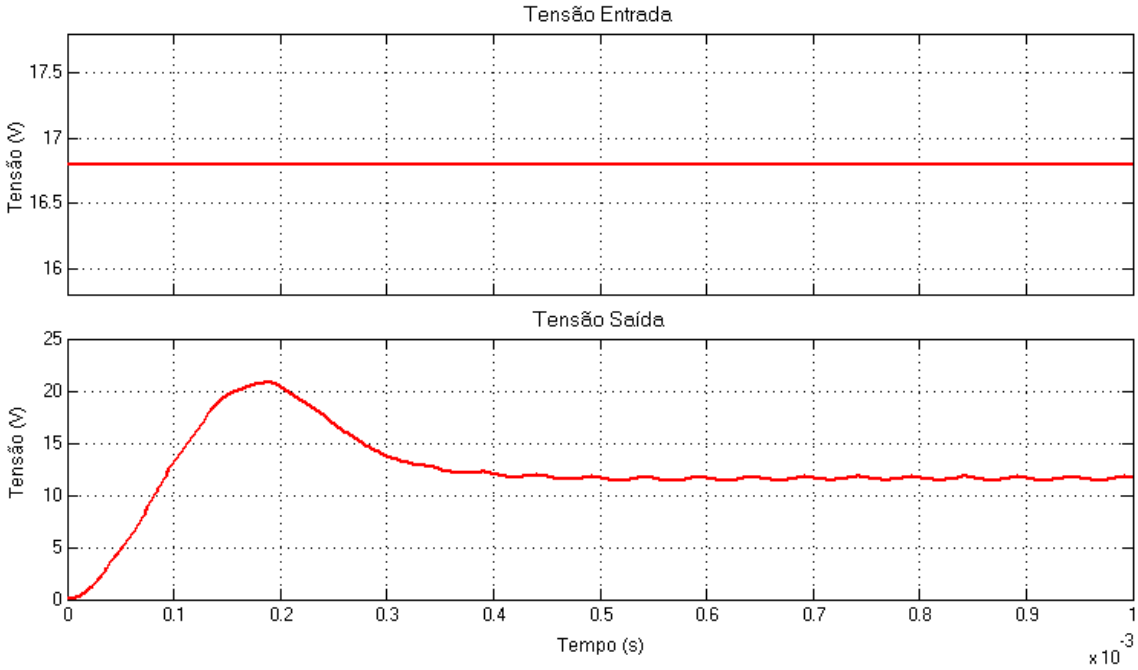


Figura 4.6 - Formas de onda da tensão de entrada e saída do conversor step-down com uma carga resistiva de 100Ω

A Figura 4.7 exibe as formas de onda da corrente e tensão no MOSFET (*drain-source*) e a corrente na bobina (i_L), que não atinge zero, o que significa que o conversor está a operar no modo de condução contínua.

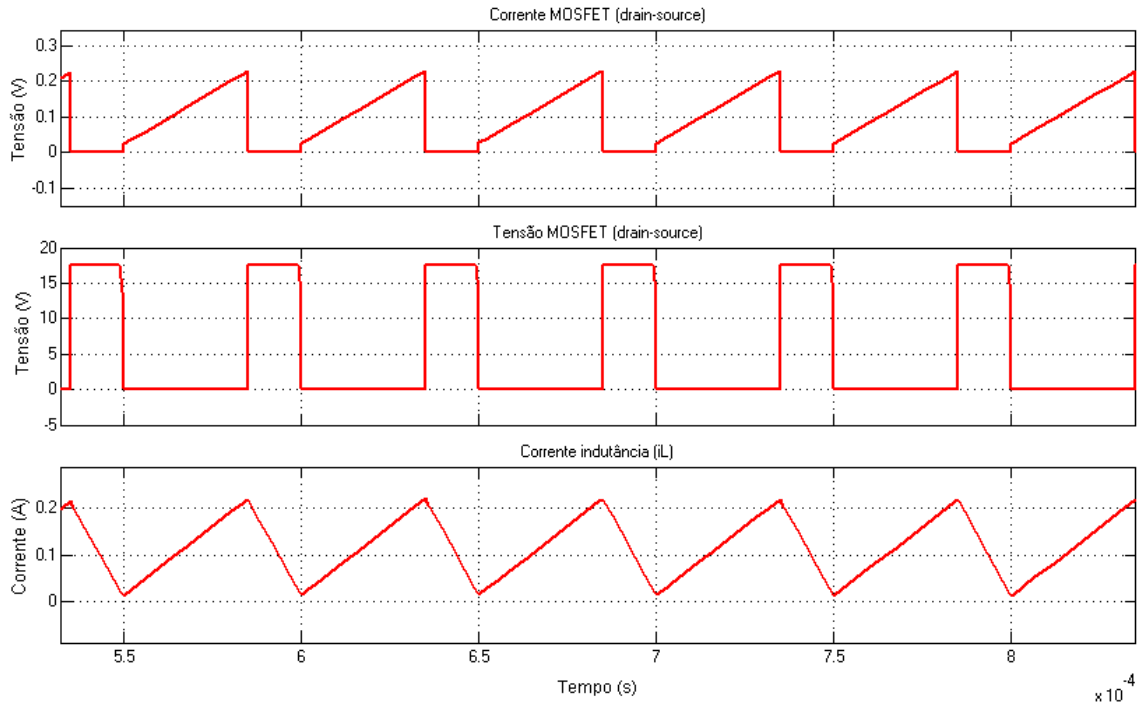


Figura 4.7 – Formas de onda da tensão e corrente no MOSFET (*drain-source*) e corrente na bobina (i_L)

Com a finalidade de simular o circuito de controlo MPPT foi desenvolvido o esquema da Figura 4.8. Para analisar o funcionamento da técnica Perturbação & Observação, o circuito MPPT implementado é constituído por dois subsistemas. No subsistema denominado de MPPT - P&O, ilustrado na Figura 4.9, encontra-se o algoritmo MPPT do método Perturbação & Observação. No outro subsistema (Figura 4.13), designado PWM, é comparado o sinal da tensão controlada, proveniente do subsistema MPPT – P&O, com uma onda triangular dente de serra de forma a gerar o sinal de controlo PWM a aplicar ao MOSFET do conversor *step-down*.

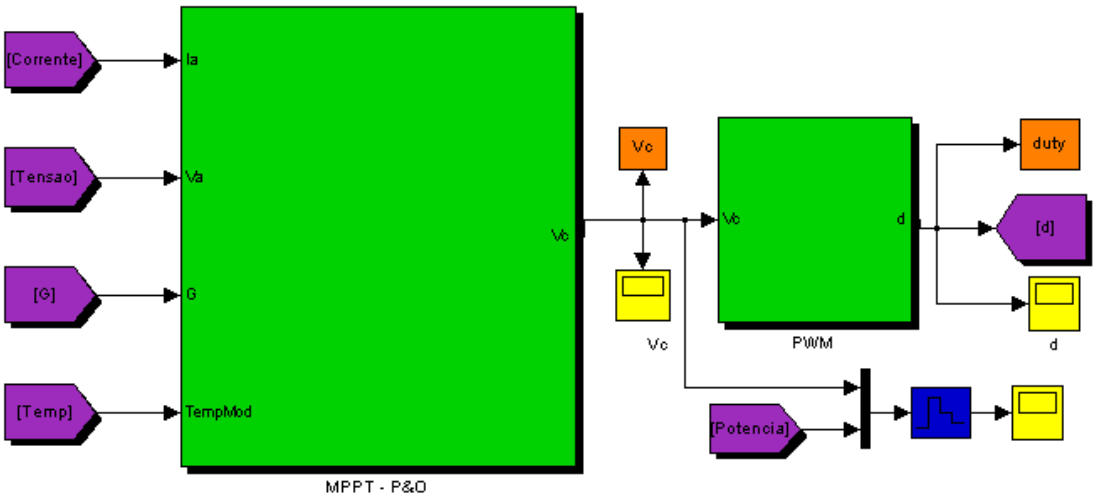


Figura 4.8 - Circuito MPPT, composto por dois subistemas, implementado para a simulação no Simulink

O subsistema MPPT - P&O desenvolvido, mostrado na Figura 4.9, não altera directamente o *duty-cycle* a aplicar ao MOSFET do conversor. Como se verifica pelo fluxograma desta técnica (Figura 3.8) o algoritmo faz o seguimento do ponto de máxima potência de maneira equivalente modificando a tensão de referência de saída do controlo MPPT, ou seja, alterando a tensão de saída do módulo fotovoltaico.

Para efeitos de programação, o algoritmo P&O tem como entrada a corrente e a tensão proveniente do painel fotovoltaico e respectiva potência, no instante em que está a operar e no anteriormente actuado, a temperatura e o valor da radiação solar incidente sobre o painel e a perturbação. O valor da perturbação tem um valor fixo e serve para perturbar periodicamente, ou seja, aumentar ou diminuir a tensão de saída do painel fotovoltaico.

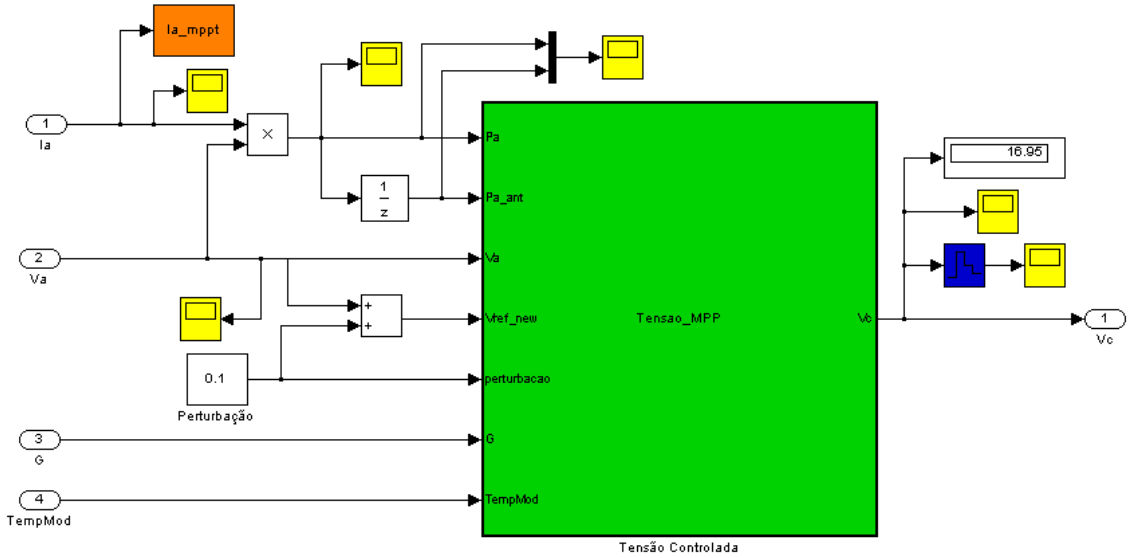


Figura 4.9 – Subsistema MPPT – P&O

De forma a demonstrar o funcionamento do algoritmo Perturbação e Observação considerou-se como entrada para o painel solar fotovoltaico as condições padrão de teste (STC), ou seja, 1000W/m^2 de radiação solar incidente a uma temperatura de 25ºC. Utilizou-se estas condições porque conhece-se, através do *datasheet* do fabricante do painel solar, o valor da tensão no ponto de máxima potência (16,8V). A Figura 4.10 apresenta a tensão controlada para um tamanho de perturbação no valor de 0,1V.

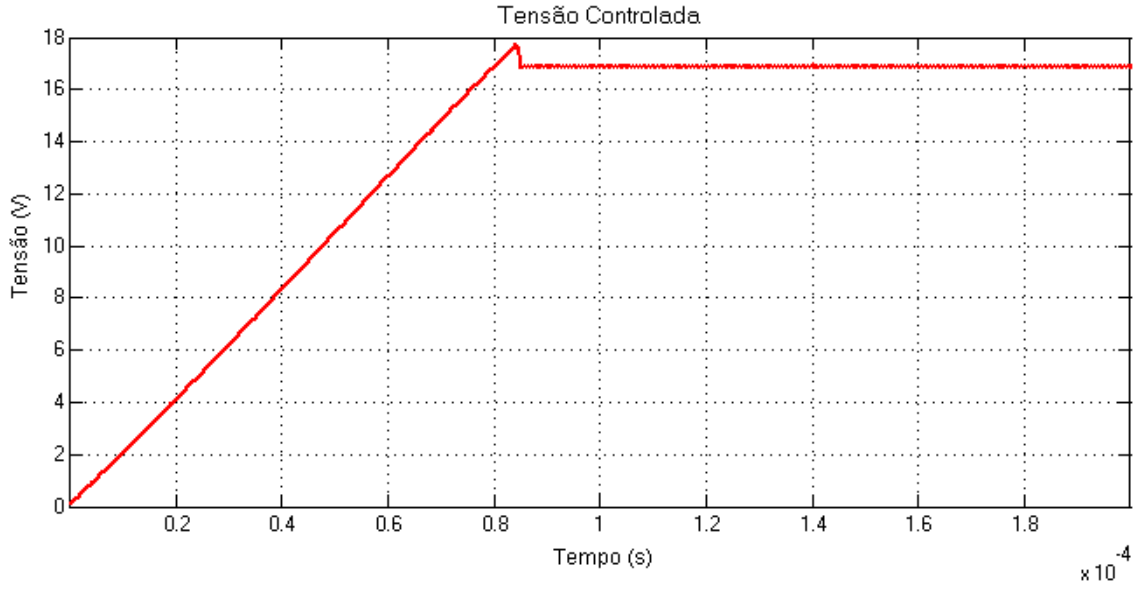


Figura 4.10 – Tensão de saída do painel fotovoltaico controlada pelo circuito MPPT

Como esperado, assim que o ponto de máxima potência é encontrado a tensão controlada estabiliza, embora com oscilações, em torno de 16,9V, que é

aproximadamente o valor de tensão de máxima potência para as condições STC (V_{mp} = 16,8V). A tensão de máxima potência nunca é atingida, pois o valor da perturbação (0,1V) provoca que o sistema, em regime permanente, oscile em torno de 16,9V, como ilustra a Figura 4.11, que representa um excerto da tensão controlada em regime permanente.

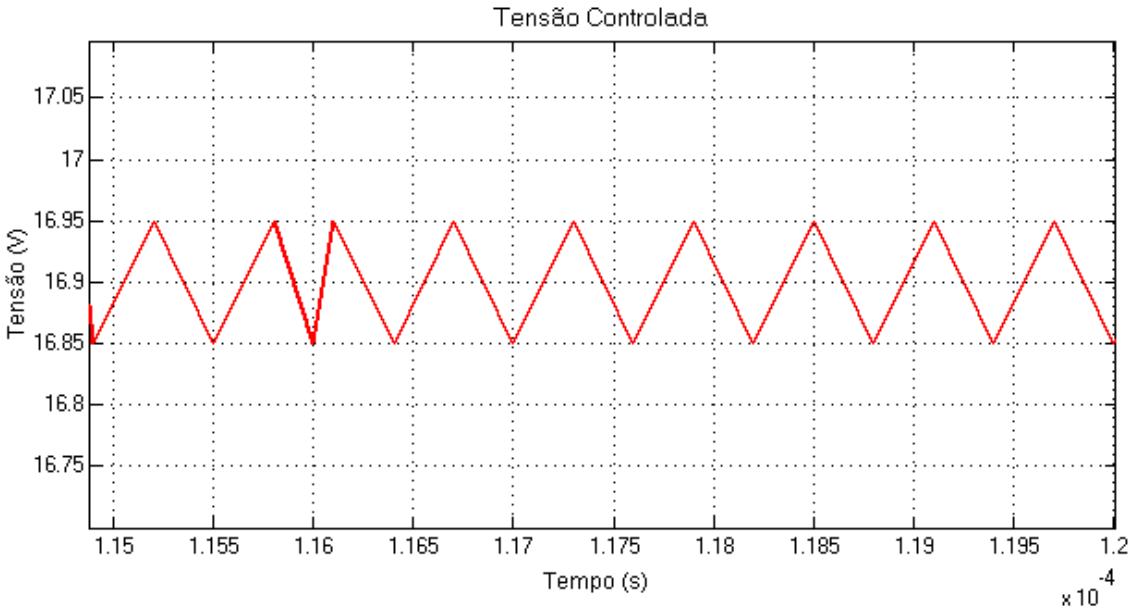


Figura 4.11 – Excerto da tensão de controlo MPPT com perturbação de valor 0,1V

Verificou-se, perante outras simulações, que aumentando o tamanho da perturbação a tensão de saída do módulo fotovoltaico atinge com maior celeridade o valor de máxima potência. Contudo, o aumento da perturbação também provoca um acréscimo nas oscilações, como mostra a Figura 4.12, o que representa um desperdício de energia proveniente do painel fotovoltaico.

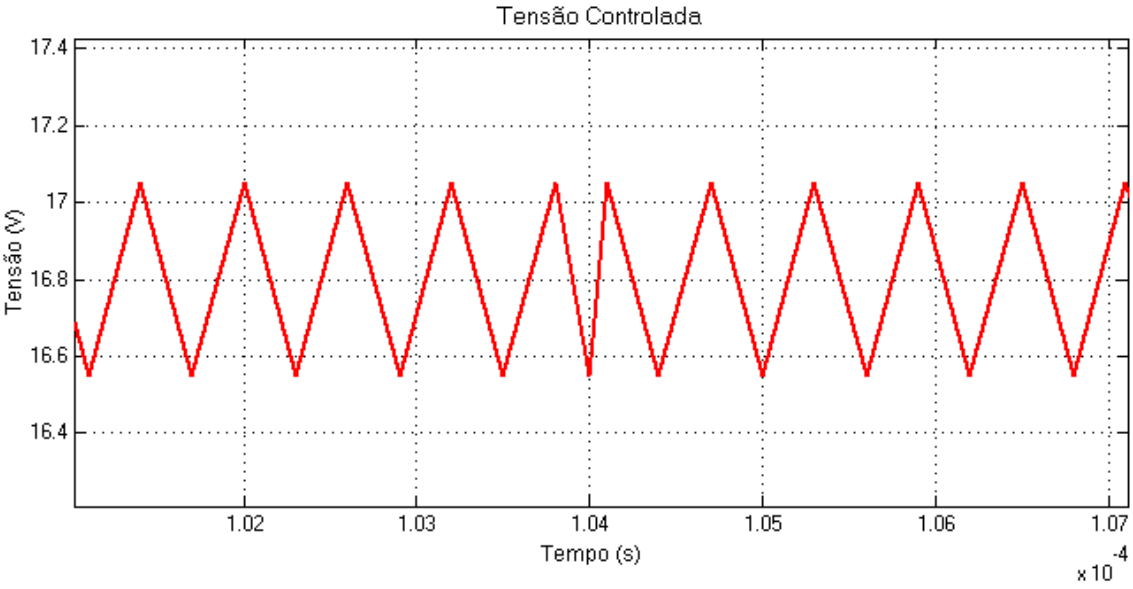


Figura 4.12 - Excerto da tensão de controlo MPPT com perturbação de valor 0,5V

Seguidamente, a tensão de saída do painel fotovoltaico controlada é comparada, através do circuito da Figura 4.13 que compõe o subsistema PWM, com uma onda dente de serra como ilustra a Figura 4.14.

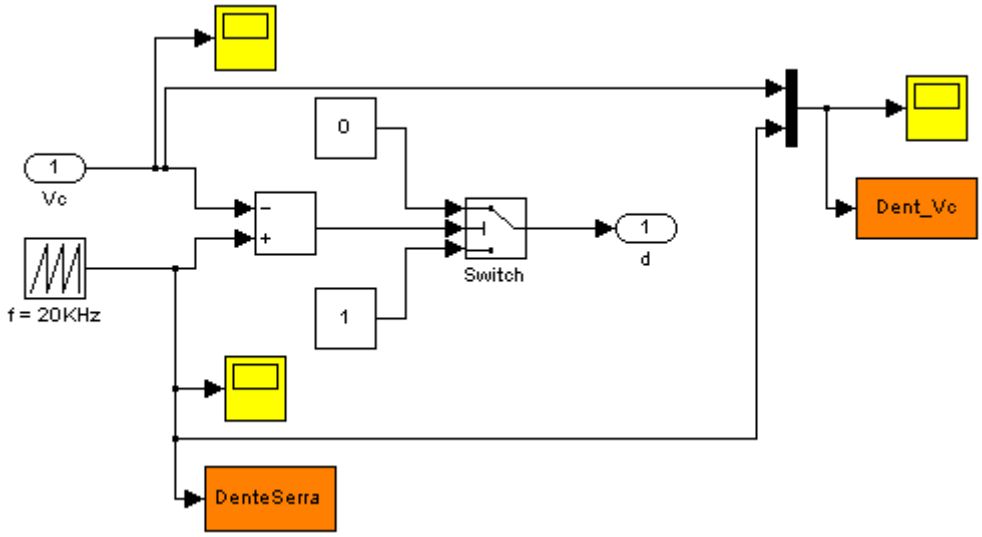


Figura 4.13 – Circuito implementado no subsistema PWM

A onda dente de serra, representada na Figura 4.14 a azul, apresenta uma frequência de 20kHz e uma amplitude 21V, que é o valor de tensão de circuito aberto do painel fotovoltaico BP SX30U.

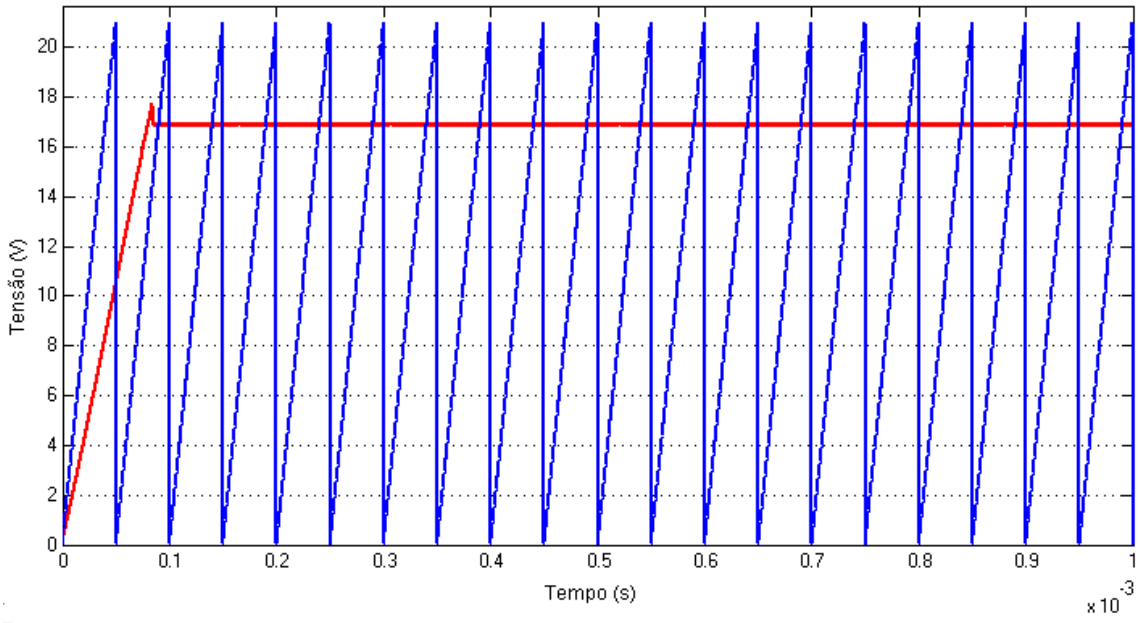


Figura 4.14 – Tensão do painel fotovoltaico controlada pelo circuito MPPT comparada com uma onda dente de serra

A comparação da tensão de saída do painel fotovoltaica controlada com a

onda dente de serra dá origem ao sinal de controlo PWM, de frequência 20kHz, caracterizado na Figura 4.15.

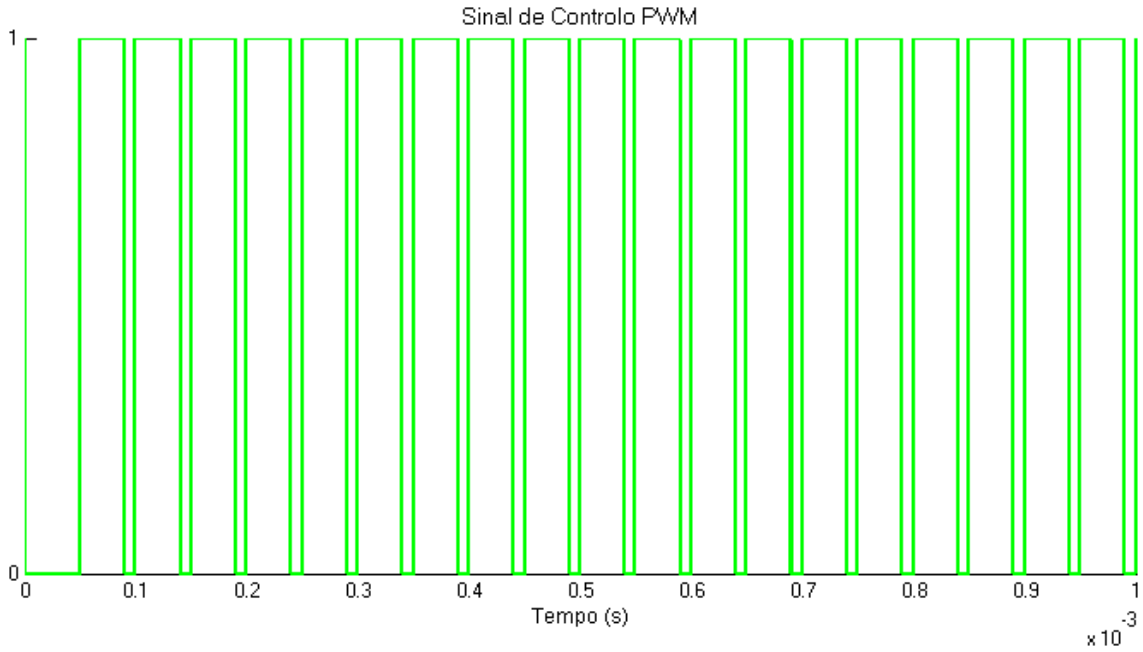


Figura 4.15 – Excerto do sinal de controlo PWM a aplicar ao MOSFET do conversor *step-down*

Para simular a bateria foi utilizado o modelo genérico para baterias recarregáveis de ácido chumbo disponível no pacote Power Systems do Simulink, representado na Figura 4.16.

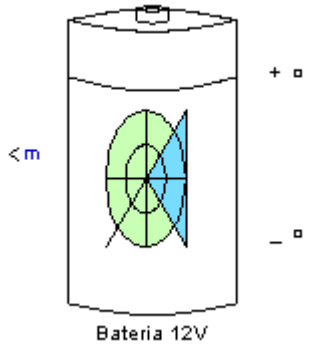


Figura 4.16 - Modelo genérico para baterias recarregáveis no pacote Power Systems do Simulink

O modelo BT-12M7.2AT da marca Baote foi a bateria utilizada nesta dissertação. As caracteristicas principais desta bateria são: 12V de tensão nominal; e uma capacidade de 7,2Ah. Estas características foram introduzidas no bloco de parâmetros do modelo genérico da bateria, como se pode verificar pela Figura 4.17. Para além destas características foi definido um estado de carga (SOC) inicial de 50%.

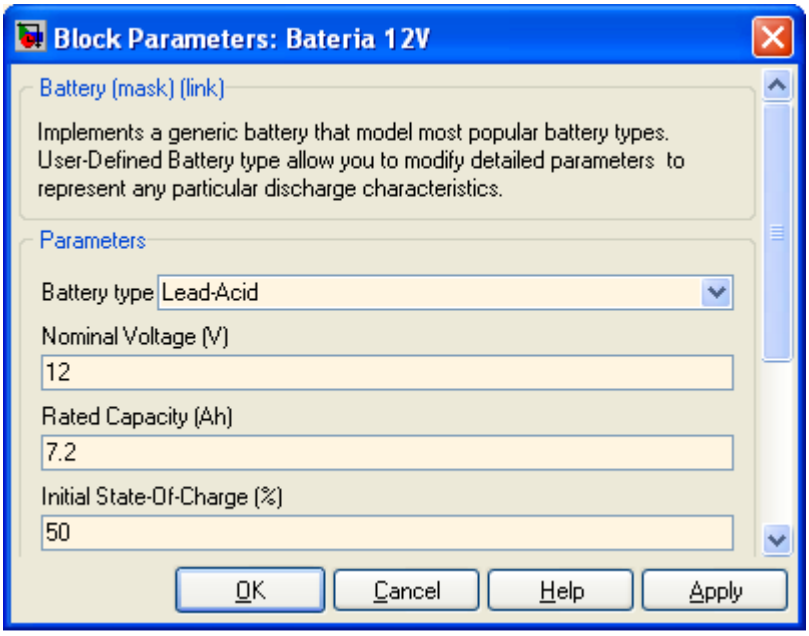


Figura 4.17 – Bloco de parâmetros do modelo genérico da bateria

A Figura 4.18 representa o circuito equivalente do modelo genérico do Simulink para uma bateria de ácido chumbo durante o carregamento. O modelo mais simples de uma bateria baseado em componentes eléctricos, visto no Capítulo 3 (Figura 3.18 (a)), é o utilizado pelo Simulink para a simulação, composto por uma resistência, que representa a resistência interna da bateria, em série com uma fonte de tensão controlada.

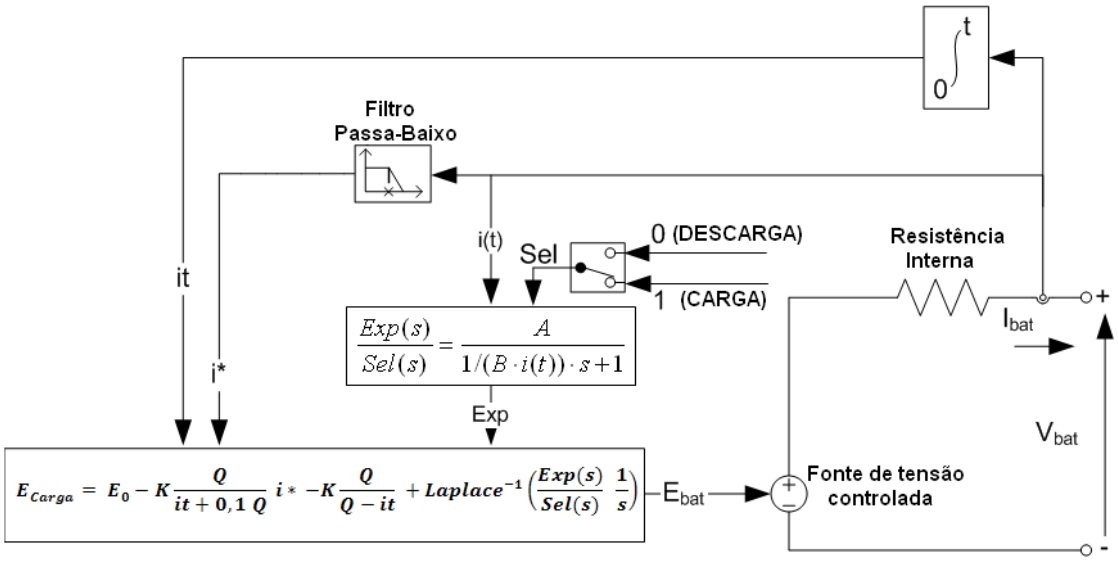


Figura 4.18 – Circuito equivalente do modelo genérico do Simulink durante o carregamento da bateria

Onde: E representa a tensão de circuito aberto da bateria (V),

E_0 é a tensão inicial da bateria (V),

K caracteriza a tensão de polarização da bateria (V),

Q é a capacidade da bateria (Ah),

it representa a carga momentânea da bateria (Ah),

A descreve a tensão exponencial da bateria (V),

B é a capacidade exponencial da bateria $(Ah)^{-1}$.

A Figura 4.19 ilustra a curva de descarga de uma bateria de ácido chumbo 12V nominal com uma capacidade de 7,2Ah.

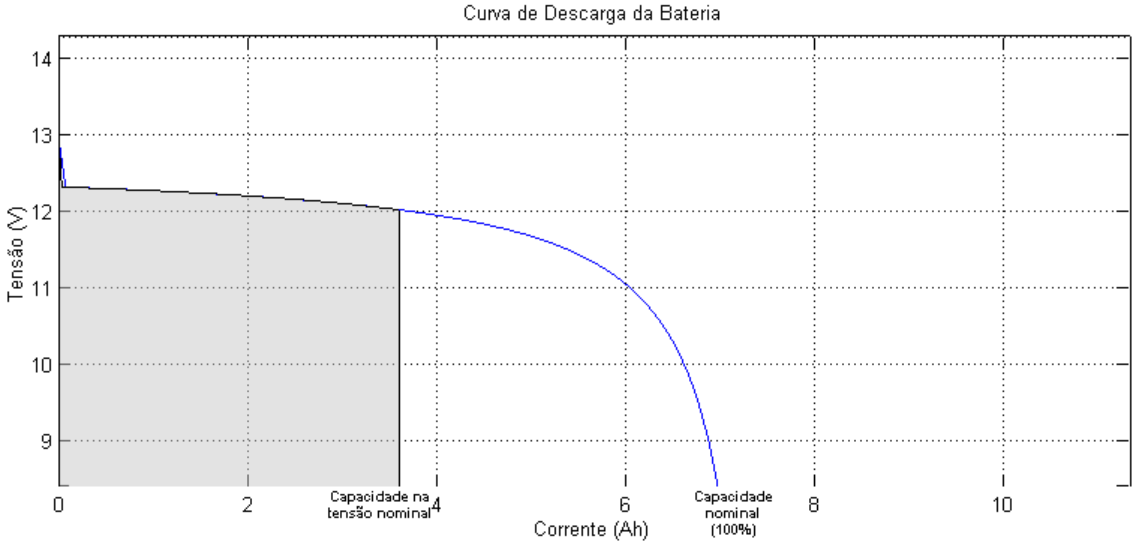


Figura 4.19 - Curva de descarga da bateria

Inicialmente, quando a bateria está totalmente carregada acontece uma queda de tensão brusca, que representa a tensão exponencial da bateria. Depois, a área que se encontra a cinzento caracteriza a carga que pode ser extraída da bateria até que a tensão atinja o seu valor nominal. A terceira fase descreve a descarga total da bateria. Quando descarregada, a bateria recarrega-se com uma corrente de 0,72A, ou seja, 10% da sua capacidade nominal, como mostra a Figura 4.20.

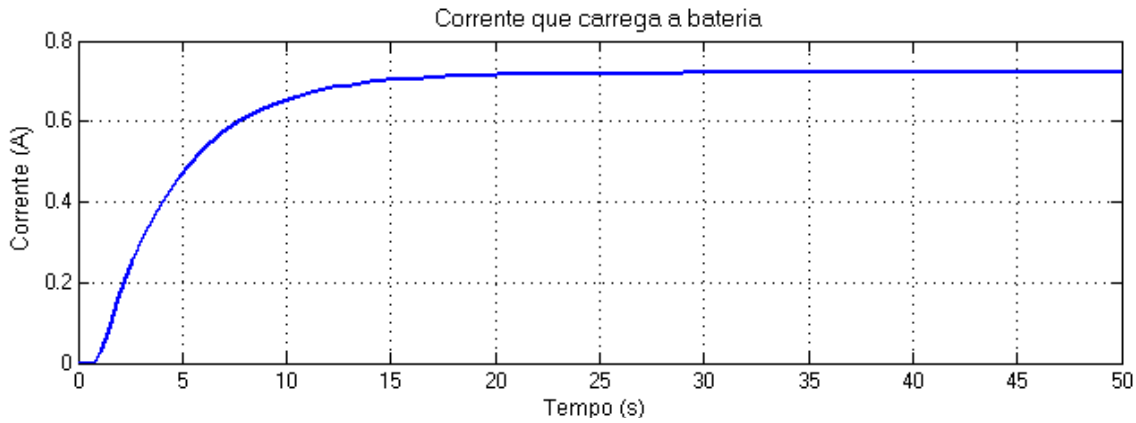


Figura 4.20 - Corrente que carrega a bateria

Na fase de carregamento o estado de carga da bateria (SOC) apresenta um comportamento mostrado na Figura 4.21.

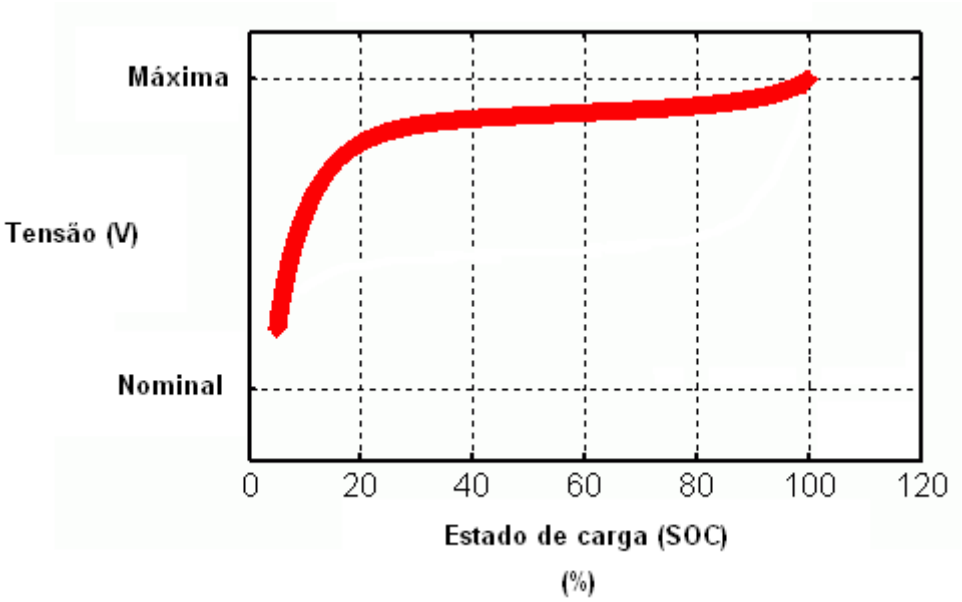


Figura 4.21 – Evolução do SOC durante o carregamento da bateria [59]

4.3. Conclusões

Neste capítulo foi apresentada a simulação computacional, efectuada no Simulink do MATLAB, de um sistema fotovoltaico autónomo capaz de alimentar um sistema de iluminação de sinais de trânsito composto por LEDs de alto brilho. O sistema fotovoltaico é composto por um circuito conversor CC-CC *step-down* que efectua a ligação entre o painel solar e o barramento CC, e proporciona que o sistema funcione sempre em pontos muito próximos do MPP, na curva característica I-V do painel solar, através do circuito de controlo MPPT. O barramento CC é composto por uma bateria de 12V que efectua o armazenamento de energia e que é capaz de alimentar a carga de CC, ou seja, a matriz de LEDs, quando a energia proveniente do painel solar não é suficiente.

No Capítulo 2 foi implementado um modelo matemático do painel solar fotovoltaico BP SX30U, que serviu de base a toda a simulação, com a solução numérica da corrente gerada pelo painel (Equação (2.21)) a ser aplicada num bloco programável, dando assim resultado às curvas características I-V e P-V do painel fotovoltaico.

Como referido anteriormente, o conversor *step-down* efectua o interface entre o painel solar e o barramento CC, e foi simulado a partir do seu circuito

eléctrico com os valores calculados no dimensionamento efectuado no Capítulo 3. Efectuaram-se simulações com o sistema a funcionar em malha aberta, com um sinal PWM fixo, e com o circuito de controlo MPPT em funcionamento, de forma a rastrear o ponto de máxima potência da curva característica P-V do painel solar, apresentando para ambas as simulações bons resultados. Para o circuito de controlo MPPT foi desenvolvido um bloco programável com o algoritmo da técnica de Perturbação & Observação.

Para simular a bateria a bateria de ácido chumbo de 12V foi utilizado o modelo genérico para baterias recarregáveis disponível no pacote Power Systems do Simulink.

A escolha pela utilização do Simulink do MATLAB na simulação computacional do sistema teve efeitos muito positivos. Além de se tratar de uma ferramenta utilizada para modelagem, simulação e análise de sistemas dinâmicos, apresentou-se um *software* bastante interessante, oferecendo uma interface gráfica amigável para o utilizador.

CAPÍTULO 5

Implementação e Resultados Experimentais

5.1. Introdução

Neste capítulo serão abordados e descritos os passos, com base em tudo que foi exposto nos capítulos anteriores, com o objectivo de caracterizar os diferentes componentes e sistemas envolvidos na implementação do sistema de iluminação de LEDs de alto brilho alimentado por um sistema fotovoltaico.

Inicialmente apresenta-se uma descrição de todo o sistema implementado, incidindo o mesmo em duas partes distintas. A primeira parte expõe a unidade de comando, responsável por efectuar todo o controlo a enviar para o semicondutor de potência do conversor CC-CC *step-down*, que representa a segunda parte, de maneira a extrair o ponto de máxima potência do módulo fotovoltaico, de efectuar o processo de carga da bateria e de controlar a intensidade luminosa dos LEDs do módulo de iluminação.

5.2. Descrição Geral do Sistema Implementado

O sistema proposto tem como objectivo gerar energia proveniente do sol através de um painel fotovoltaico durante o dia, e alimentar um sistema de iluminação composto por LEDs de alto brilho incorporados num sinal rodoviário durante a noite. Desta forma, é necessário agrupar ao sistema uma bateria de ácido chumbo para efectuar o armazenamento da energia. A Figura 5.1 representa o diagrama de blocos do sistema proposto, que é constituído por um módulo fotovoltaico, composto por um painel solar, um conversor CC-CC do tipo *step-down*, capaz de fazer o interface entre o painel e a bateria de forma a elaborar um correcto processo de regulação da carga da bateria e também extrair a máxima potência proveniente do módulo fotovoltaico, através

do controlo MPPT. O sistema tem como consumidor final da energia gerada no módulo fotovoltaico e armazenada na bateria de ácido chumbo um sistema de iluminação, composto por uma matriz de LEDs de alto brilho que afiguram um sinal rodoviário. O sistema de controlo, além de realizar o processo de carga da bateria e de efectuar o seguimento do ponto de máxima potência do painel, produz o controlo do sistema de iluminação, enviando a intensidade do brilho a aplicar aos LEDs.

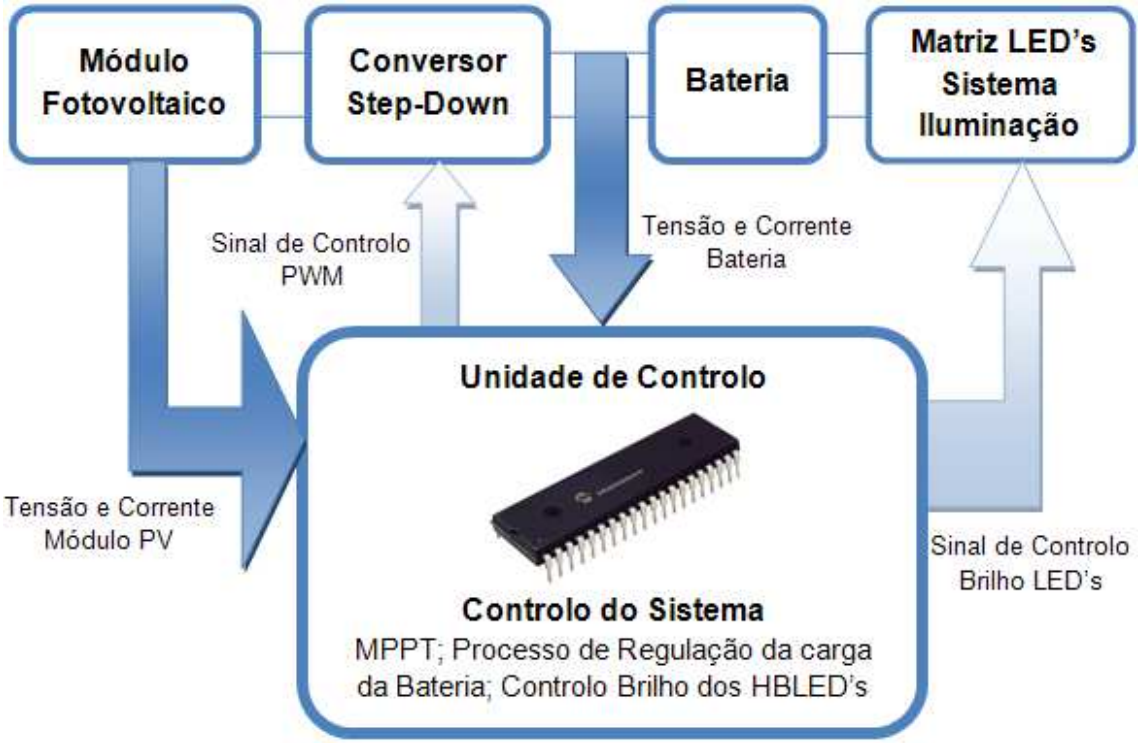

Módulo Fotovoltaico
Conversor Step-Down
Bateria
Matriz LED's Sistema Iluminação
Sinal de Controlo PWM
Tensão e Corrente Bateria
Unidade de Controlo
Tensão e Corrente Módulo PV
Sinal de Controlo Brilho LED's
Controlo do Sistema
MPPT; Processo de Regulação da carga da Bateria; Controlo Brilho dos HBLED's

Figura 5.1 – Diagrama de blocos do sistema implementado

Em sistemas de iluminação alimentados por módulos fotovoltaicos, a escolha dos componentes que o compõem é muito importante para a racionalização dos custos, para prever a capacidade de adaptação ao meio que serão envolvidos e acima de tudo à eficiência energética que o sistema proporciona. Habitualmente, os painéis solares são o componente mais caro do sistema, seguindo-se as matrizes de LEDs de alto brilho que constituem o módulo de iluminação. Devido à indisponibilidade do painel solar fotovoltaico, foi utilizada uma fonte de alimentação CC de 30V e 3A nominais, representada na Figura 5.2, de forma a emular o módulo fotovoltaico BP SX30U, modelado no Capítulo 2, que tem como características limites uma tensão de circuito aberto de 21V e uma corrente de curto-circuito de 1,94A.

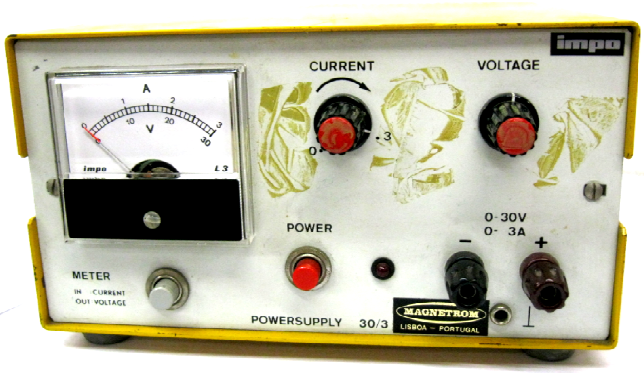


Figura 5.2 – Fonte de alimentação(30V, 3A) utilizada para emular o painel fotovoltaico

Na Figura 5.3 é apresentada a bancada de testes juntamente com o sistema implementado, composto pela unidade de controlo e pelo conversor *step-down,* com controlo MPPT e como controlador de carga da bateria.

Figura 5.3 – Bancada de testes do sistema implementado

5.3. Unidade de Comando

A unidade de comando é constituída por diversos circuitos individuais e é responsável por todos os sinais de controlo gerados pelo componente principal desta unidade, o microcontrolador. O circuito de medida, também ele composto

por diferentes circuitos, é responsável pela aquisição das tensões aos terminais do painel solar e da bateria, assim como pela obtenção das correntes na bateria e provenientes do painel fotovoltaico. Por fim, o circuito acoplador óptico, é o elo de ligação com o conversor *step-down* e é encarregue essencialmente pelo isolamento entre os dois circuitos. O diagrama de blocos da Figura 5.4 mostra a constituição da unidade de comando.

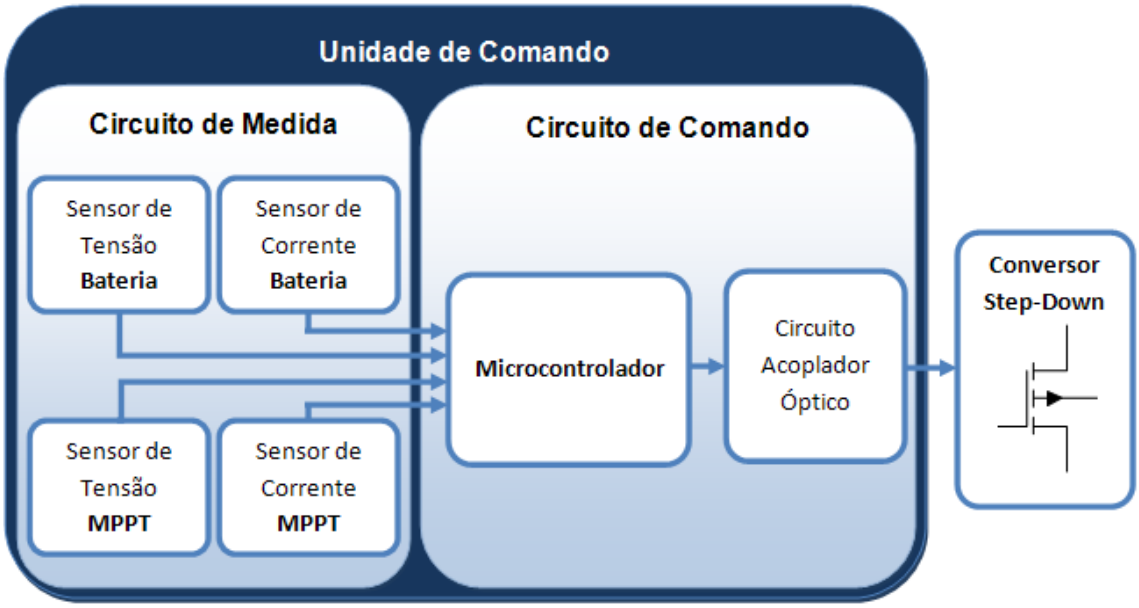


Figura 5.4 - Diagrama de blocos da unidade de comando

5.3.1. Microcontrolador

O microcontrolador é o componente principal de todo o sistema, pois é o elemento encarregue por toda a comunicação e controlo entre todos os periféricos de entrada e saída, assim como o de armazenamento de dados. O microcontrolador utilizado foi o PIC18F4431 cujo aspecto está representado na Figura 5.5. A escolha por este microcontrolador baseou-se sobretudo nas necessidades intrínsecas do projecto.

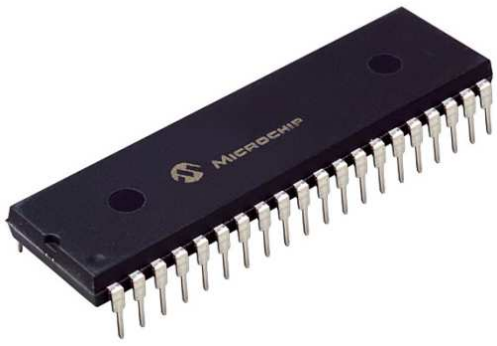


Figura 5.5 - Microcontrolador PIC18F4431 da *Microchip*

O PIC18F4431 faz parte de uma família de microcontroladores fabricados pela *Microchip Technology* com extensa variedade de modelos e periféricos internos, com arquitectura Harvard e conjunto de instruções RISC, com recursos de programação por memória Flash e EEPROM. Funciona com tensão de alimentação de 5V e possui 40 pinos. Este microcontrolador tem como principais características técnicas possuir até 8 saídas PWM com 4 geradores de *duty-cycle*, um módulo Conversor Analógico-Digital (ADC), que suporta até 9 canais, que permitem a conversão de um sinal analógico para um número digital de 10bits correspondente, conseguindo obter 200000 amostras por segundo (apenas num canal), ou seja, uma amostra a cada 5µs. Possui ainda 3 *Timers* de 16bits e um de 8bits, 16384 *bytes* de memória de programa, 768 *bytes* de memória RAM e 256 *bytes* de EEPROM. Há o reconhecimento de interrupções externas como de periféricos internos. A Figura 5.6 ilustra o diagrama de pinos do PIC18F4431 [60].

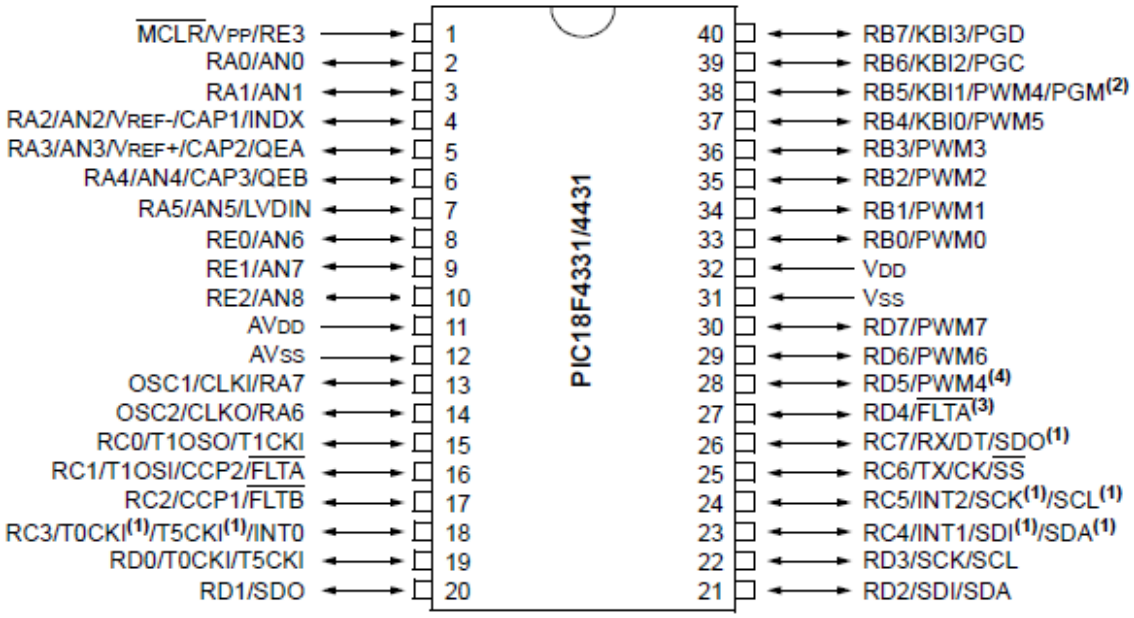


Figura 5.6 – Diagrama de pinos do microcontrolador PIC18F4431 [60]

O PIC18F4431 pode ser programado numa linguagem de baixo nível como o Assembly com recurso a compiladores assembler ou utilizando-se compiladores de linguagem de alto nível (C, Pascal, Basic) que geram um código em formato hexadecimal que é usado para ser gravado na memória de programa do PIC. Para efectuar a programação do microcontrolador é essencial um circuito capaz de fazer o interface entre este e o computador. Para tal, utilizou-se o programador ICD2 produzido pela *Microchip*, Figura 5.7.

Figura 5.7 – Programador ICD2 da *Microship* para interface do PIC com o computador

O *software* utilizado para o desenvolvimento dos programas a enviar para o PIC18F4431, através do programador ICD2, foi o MPLAB IDE v8.33. A linguagem de programação usada foi o C, utilizando-se o CCS C *Compiler* para compilar os programas.

5.3.2. Interface PIC18F4431 com LCD Nokia 3310

De forma a elaborar uma monitorização do sistema, principalmente para verificar a tensão e corrente provenientes do painel solar e a tensão e corrente na bateria, utilizou-se um LCD. O modelo utilizado foi o LCD do telemóvel Nokia 3310. Este é um pequeno LCD com um ecrã monocromático e uma interface gráfica agradável. O visor é de 38 * 35 mm com uma superfície de exibição de 30 * 22 mm e uma resolução de 84 * 48 pixéis.

O interface entre LCD e o PIC18F4431 é feito via SPI (Serial Peripheral Interface) e necessita apenas de utilizar 5 portos I/0 do microcontrolador. O PCD8544 da Philips é o controlador do LCD do Nokia 3310, ou seja, o PIC18F4431 envia instruções para o controlador e este traduz e apresenta o resultado no LCD. A Figura 5.8 ilustra a parte frontal e traseira do LCD e os 8 pinos constituintes do mesmo.

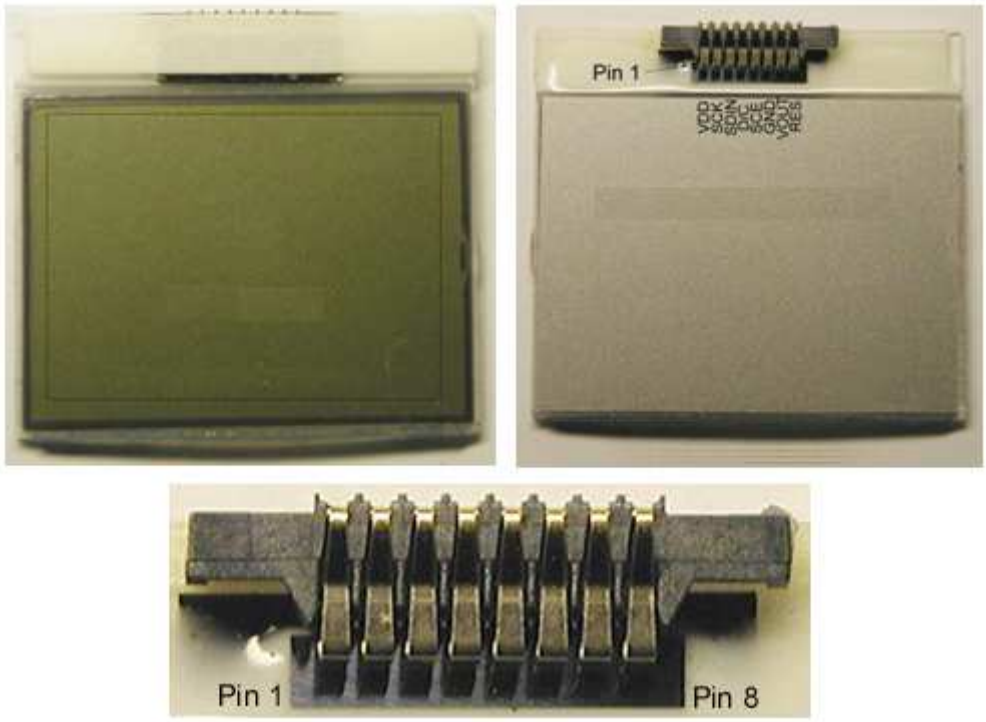


Figura 5.8 – Parte frontal, traseira e pinos do LCD Nokia 3310

A Tabela 5.1 apresenta as especificações eléctricas de cada um dos pinos constituintes do LCD e como influenciam no interface com o PIC18F4431.

Tabela 5.1 – Especificações eléctricas dos pinos do LCD Nokia 3310

Pino	Sinal	Descrição
1	VDD	Alimentação de entrada. Faixa de tensão recomendada entre VDD e GND: 2.7V a 3.3V.
2	SCLK	Serial Clock. Entrada para o sinal de clock: 0.0 a 4.0Mbits/s.
3	SDIN	Serial Data Input. Entrada do pacote de dados.
4	D/C	Data/Command. Para seleccionar o comando/endereço ou entrada de dados.
5	SCE	Chip enable. Permite gerir dados através do clock interno do PIC.
6	GND	Ground.
7	VOUT	Tensão de saída. É Necessário adicionar externamente um condensador electrolítico de 10µF entre VOUT e GND
8	RES	External Reset. Este sinal permite reiniciar o dispositivo.

Como se verifica na Tabela 5.1, pela descrição dos pinos, para se elaborar o interface do LCD com o PIC18F4431 são necessários componentes extra, no caso dois condensadores electrolíticos de 10µF. O esquema eléctrico de interface entre o PIC e o LCD está representado na Figura 5.9. Esta figura engloba também todo o esquema eléctrico utilizado para a Unidade de Comando.

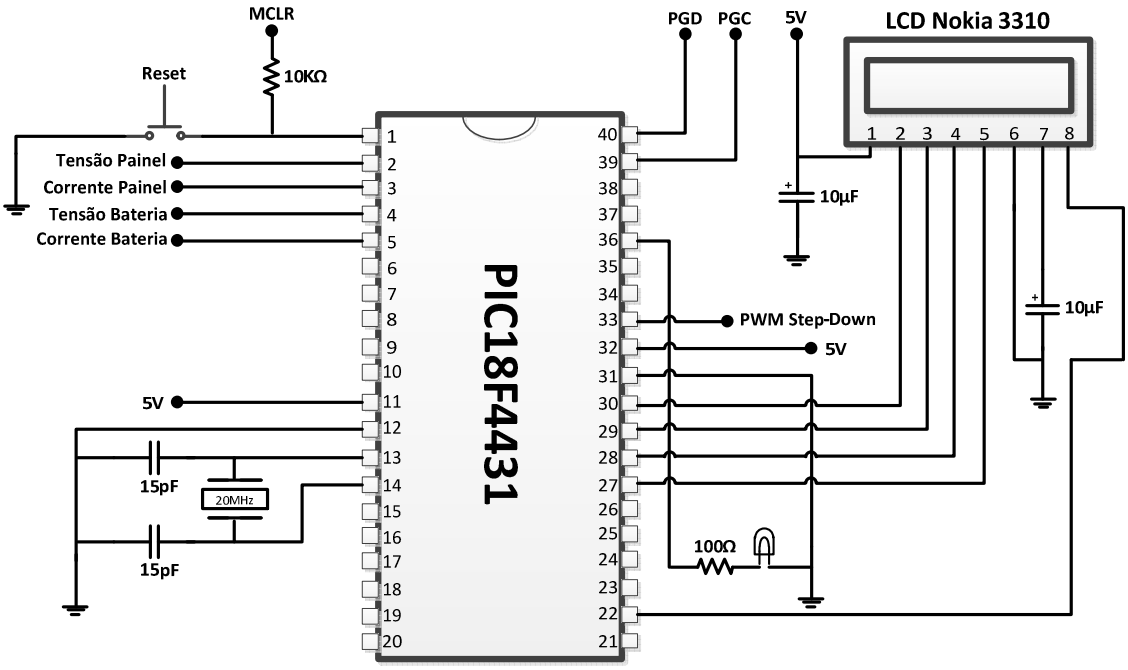


Figura 5.9 – Esquema eléctrico da placa do microcontrolador PIC18F4431

De notar que as ligações efectuadas aos pinos MCLR, PGD e PGC são necessárias para fazer a ligação do microcontrolador com o computador, para desta forma se efectuar a programação do PIC através do programador ICD2. O *clock* externo ligado ao PIC18F4431 entre os pinos 13 e 14 tem uma frequência de 20MHz. O LED ligado ao pino número 36 é um indicador de quando o sistema está activado. O *Reset* manual torna mais prático o sistema quando se pretende efectuar o reinício do mesmo.

A Figura 5.10 mostra a placa da Unidade de Comando implementada em conjunto com o LCD do Nokia 3310.

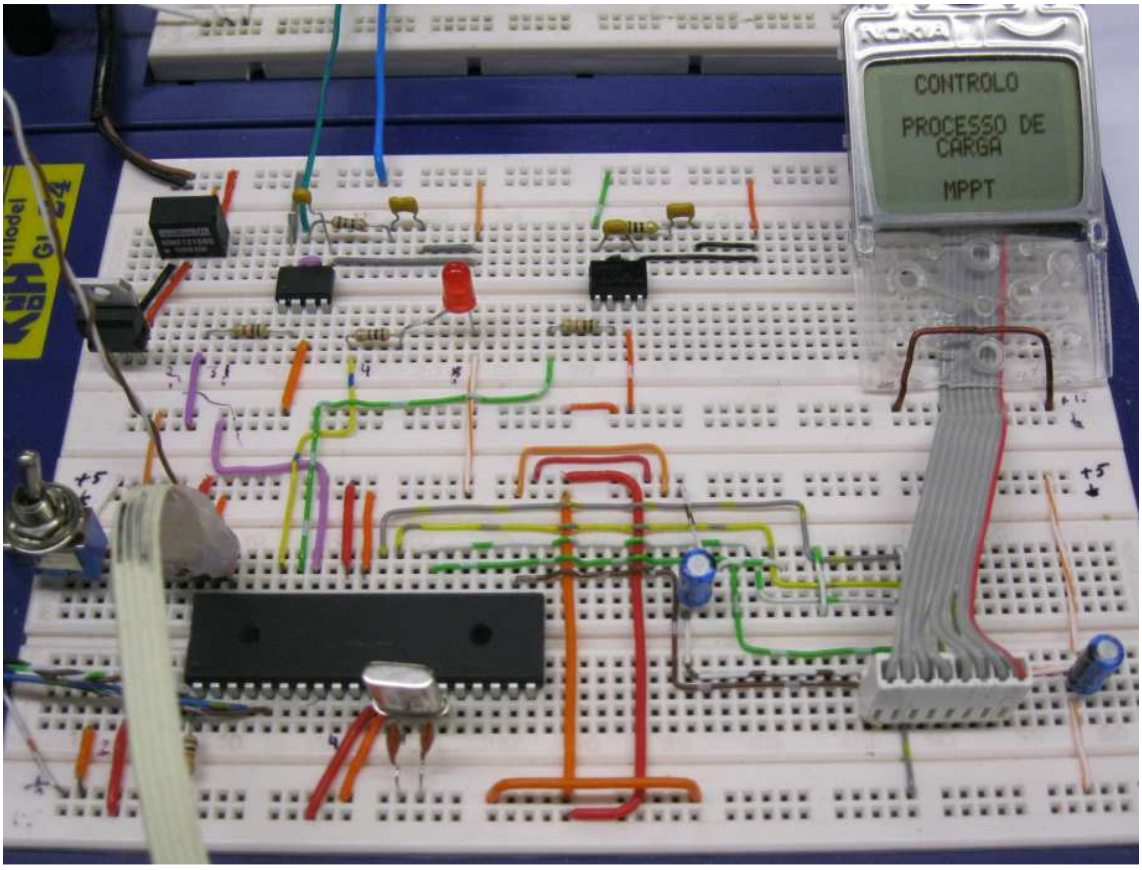


Figura 5.10 - Placa da Unidade de Comando

5.3.3. Circuito Acoplador Óptico

Os circuitos acopladores ópticos são importantes pois permitem, por exemplo, interligar um circuito de fraco sinal com outro de sinal mais forte. Os acopladores ópticos oferecem como principal vantagem a imunidade a interferências electromagnéticas, sendo utilizados em variadas aplicações devido à necessidade de isolamento eléctrico entre o circuito de comando e o circuito de potência. Desta forma, os sinais de controlo PWM gerados no PIC18F4431 não podem ser aplicados directamente ao conversor CC-CC *Step-down* para controlar o *duty-cycle* aplicado ao MOSFET. O circuito acoplador que actua como interface entre o circuito de comando e o circuito de potência é constituído essencialmente por um acoplador óptico da *Hewlett Packard* com a referência HCPL-3120, cujo diagrama funcional está representado na Figura 5.11. Estes acopladores ópticos caracterizam-se também pela sua rapidez, tendo em conta a frequência de comutação de 20kHz aplicada ao MOSFET.

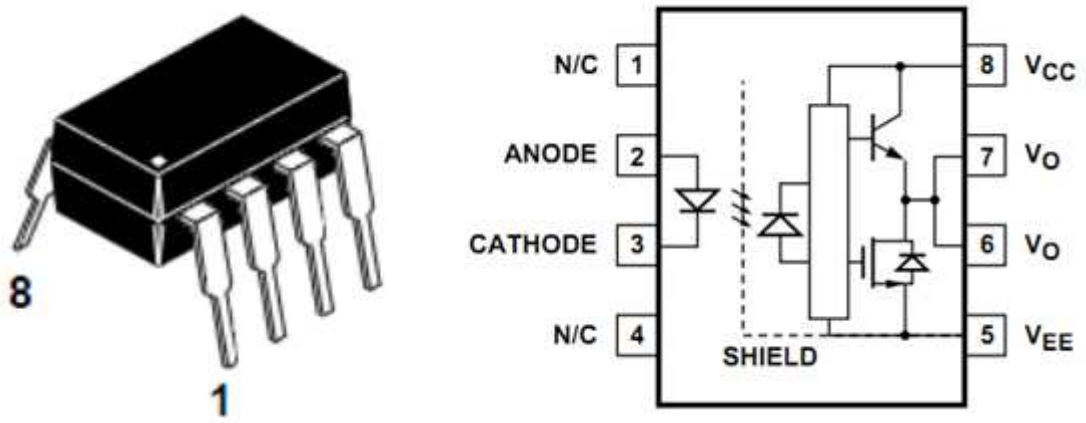


Figura 5.11 - Diagrama funcional do acoplador óptico da *Hewlett Packard* HCPL-3120

Para assegurar o isolamento galvânico completo entre o circuito de comando e o circuito de potência, é necessário o uso de fontes de alimentação distintas nos dois circuitos, para desta forma as massas de ambos também serem diferentes. Assim, do lado do circuito de potência o acoplador óptico é alimentado por uma fonte CC-CC (NME1215SC) que para além de garantir que os circuitos tenham massas diferentes, também assegura os níveis de tensão adequados do sinal de controlo PWM, gerado no PIC18F4431, para a comutação perfeita do MOSFET do conversor *Step-Down*. A Figura 5.12 ilustra o esquema do circuito acoplador óptico implementado e a Figura 5.13 o esquema implementado numa *breadboard*.

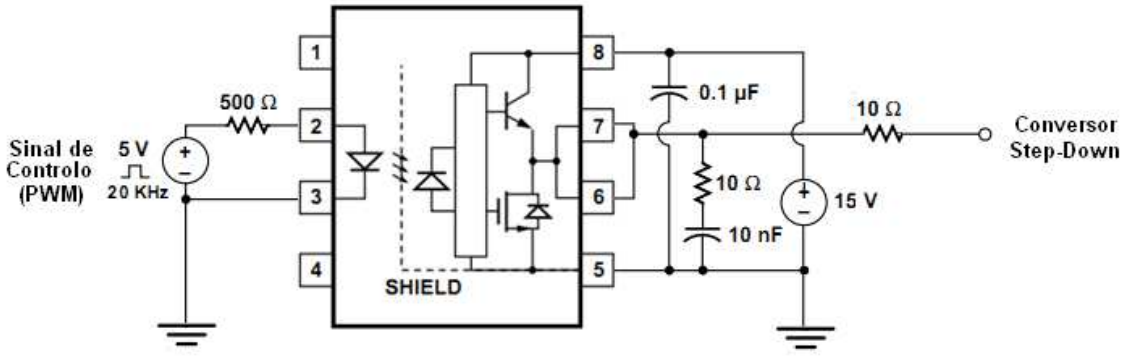


Figura 5.12 – Esquema do circuito acoplador implementado com base no HCPL-3120

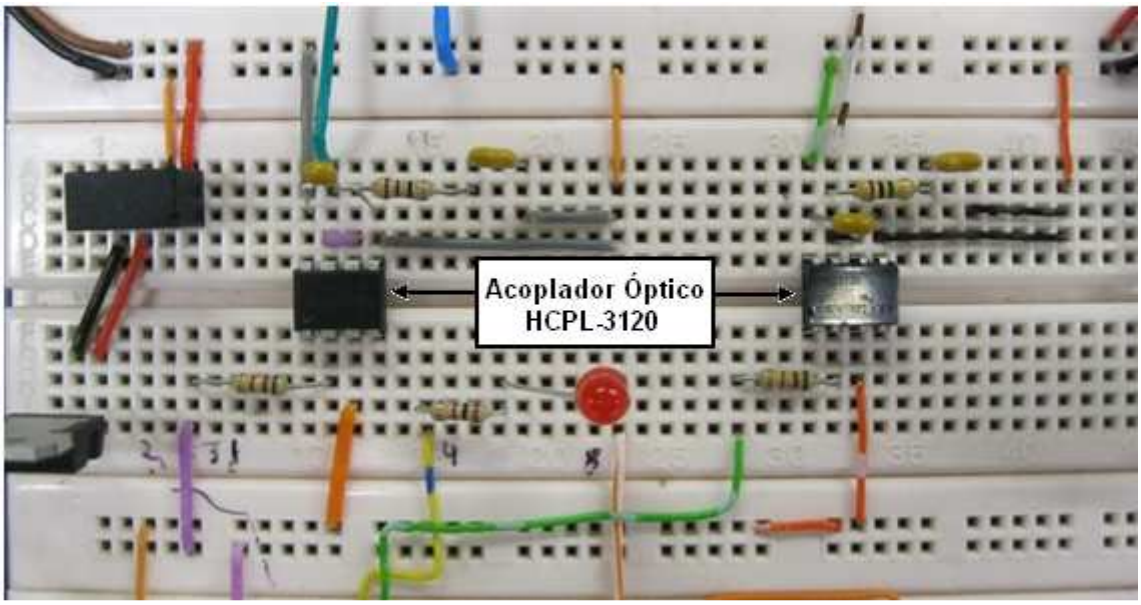


Figura 5.13 – Placa do circuito acoplador óptico

Como referido anteriormente, os resultados previstos do circuito acoplador óptico passam por transformar um sinal de PWM, com valor o valor do *duty cycle* definido pelo PIC18F4431, num sinal com um valor de tensão superior para aplicar à *gate* do MOSFET do conversor *step-down*.

O sinal PWM gerado no microcontrolador apresenta uma tensão de 0 ou 5V, como se verifica na Figura 5.14, e ao ser enviado para o circuito acoplador óptico apresenta à saída do mesmo níveis de tensão de 0 ou 16V, Figura 5.15.

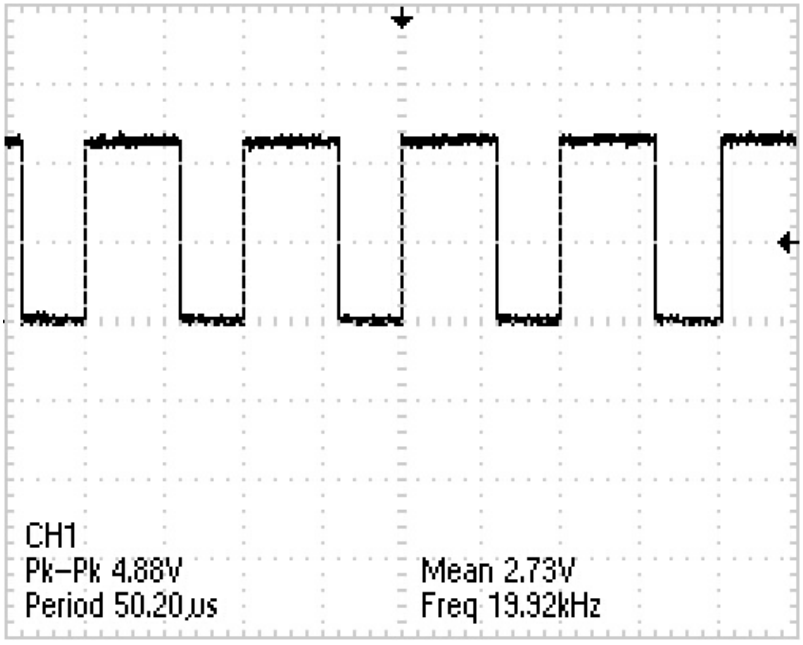


Figura 5.14 – Sinal PWM à saída do microcontrolador PIC18F4431

Quando à saída do PIC o sinal de PWM se encontrar com 0V, serão também 0V a aplicar ao MOSFET do conversor, mantendo o semicondutor no estado de não condução. Por outro lado, quando o microcontrolador apresentar um sinal de PWM no nível lógico alto (5V), serão aplicados à *gate* do MOSFET do *step-down* um sinal de aproximadamente 16V, assegurando a passagem de corrente no conversor, pelo estado de condução do semicondutor.

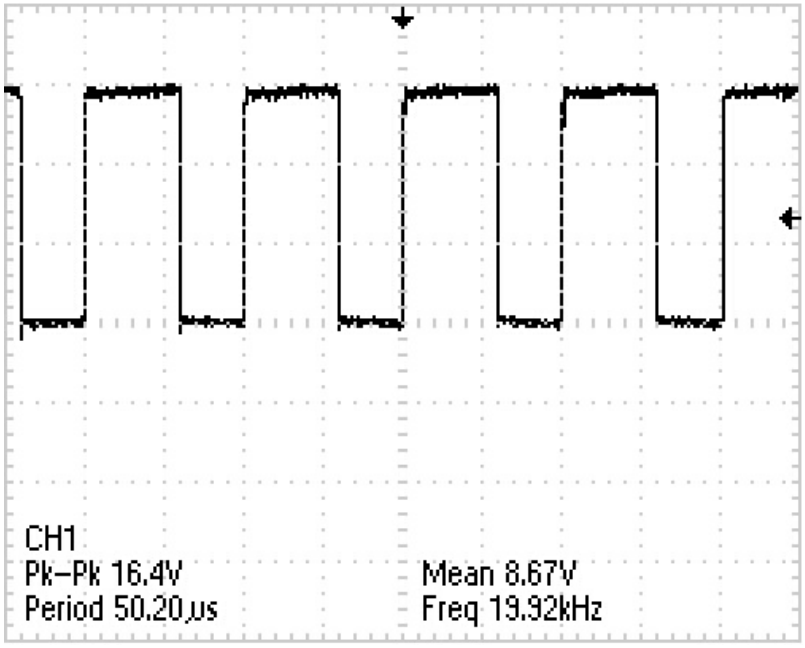


Figura 5.15 – Sinal PWM à saida do circuito acoplador óptico para aplicar ao MOSFET do conversor step-down

5.3.4. Circuito de Medida

O circuito de medida, composto por quatro sensores, é utilizado no sistema para executar a medição e fazer o processamento do valor da tensão e da corrente da bateria, para que desta forma se realize um correcto método de carregamento da mesma. Este circuito efectua também a medição e elabora o processamento do valor da tensão aos terminais do painel solar e da corrente fornecida pelo mesmo. As medições aos valores provenientes do painel solar tem como base o desenvolvimento do algoritmo de controlo do circuito MPPT. A leitura dos variados valores é feita através de sensores de efeito *Hall*, e esses sinais são recebidos pelo microcontrolador através do ADC que converte os sinais analógicos em digitais de maneira a efectuar o controlo do sistema. O diagrama de blocos da Figura 5.16 representa a utilização do PIC neste circuito.

Figura 5.16 - Diagrama de blocos da ligação do circuito de medida com o circuito acoplador óptico

A Figura 5.17 ilustra a placa dos circuitos de medida implementados numa *breadboard*. Estes circuitos fazem parte e são utilizados pela Unidade de Comando.

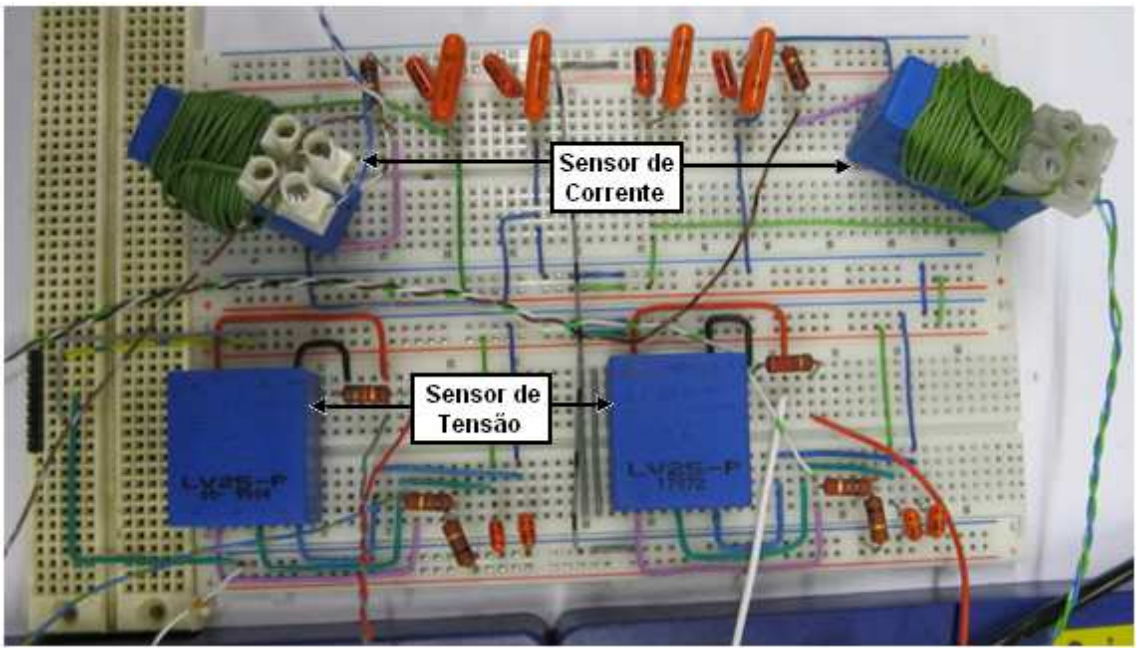


Figura 5.17 – Placa do circuito de medida

5.3.4.1. Sensor de Tensão de Efeito Hall

Os sensores de tensão de efeito *Hall* utilizados para a medição dos valores da tensão aos terminais do painel solar e da bateria foram os LV25-P da LEM. A Figura 5.18 mostra o aspecto destes sensores.

Figura 5.18 – Sensor de tensao de efeito *Hall* LV25-P da LEM

Este sensor tem a capacidade de leitura máxima de tensões até 500V e apresenta uma corrente nominal no primário de 10mA. A razão de conversão do sensor é de 2500:1000, sendo que a corrente nominal no secundário apresenta um valor de 25mA [61]. O sensor pode ser alimentado com: -15V, GND, +15V ou -12V, GND, +12V. A Figura 5.19 representa o esquema de ligações utilizado para os sensores de tensão.

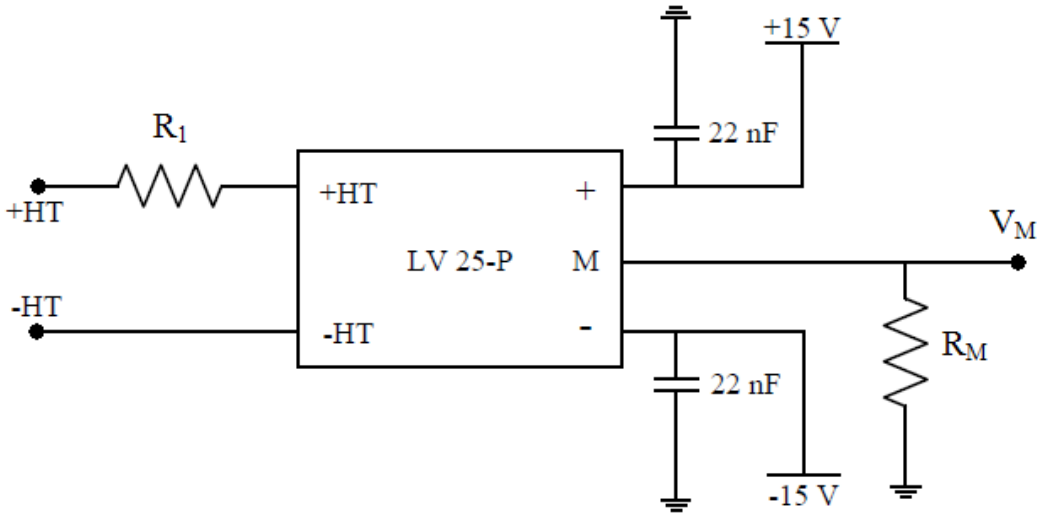


Figura 5.19 – Esquema de ligações do sensor de tensão LV25-P

A equação (5.1) permite determinar o valor da resistência R_1 com base na tensão máxima (V_{MAX}) que se pretende medir, e que a corrente nominal no primário do sensor (I_{PN}) não ultrapasse o valor de 10mA.

$$R_1 = \frac{V_{MAX}}{I_{PN}} \tag{5.1}$$

Como o PIC18F4431 tem como limite nas suas entradas valores de tensão entre 0 e 5V, o valor máximo de tensão admitido no terminal M do secundário do sensor é 5V. A resistência de medida (R_M) deve ser dimensionada com base neste fundamento, ou seja, com um valor máximo de tensão aos seus terminais de 5V e uma corrente nominal que não ultrapasse os 25mA. Assim, a equação (5.2) permite calcular a resistência R_M.

$$R_M = \frac{V_M}{I_{SN}} \tag{5.2}$$

Desta forma, é possível dimensionar ambas as resistências (R_1 e R_M) para medir a tensão aos terminais de ambos os componentes utilizados, o painel fotovoltaico e a bateria.

Para o painel fotovoltaico, a tensão máxima que pode ser medida é a tensão de circuito aberto (V_{OC}) de valor 21V. Assim, as equações (5.3) e (5.4) determinam os valores das resistências.

$$R_1 = \frac{21V}{10mA} = 2{,}1K\Omega \tag{5.3}$$

$$R_M = \frac{5V}{25mA} = 200\Omega \tag{5.4}$$

O valor de R_M é igual para o painel solar e para a bateria, pois neste caso o que prevalece é a tensão máxima que o microcontrolador admite. Contudo, para a resistência R_1 definiu-se uma tensão máxima a ser medida de 15V. Logo, a equação (5.5) calcula o valor dessa resistência para o circuito da bateria.

$$R_1 = \frac{15V}{10mA} = 1{,}5K\Omega \tag{5.5}$$

Para alimentar com a tensão apropriada o sensor de tensão e o sensor de corrente, que será explicado no ponto seguinte, utilizou-se uma fonte de alimentação que está representada na Figura 5.20. Esta fonte é capaz de fornecer consecutivamente +15V, +12V, +5V, 0V, -15V de tensão continua.

Figura 5.20 – Fonte de alimentação utilizada para alimentar o circuito de medida

Como resultados do circuito de medida, mais concretamente no caso dos sensores de tensão, pretende-se uma correcta precisão na medida dos valores da tensão aos terminais da painel solar e da bateria, pois é a partir destes valores que se elabora o circuito de controlo MPPT e o controlo da carga da bateria respectivamente. A Figura 5.21 mostra o resultado da medição do valor da tensão aos terminais do painel fotovoltaico. A Figura 5.22 apresenta o resultado da medição do valor da tensão aos terminais da bateria.

Figura 5.21 – Medição do valor da tensão aos terminais do painel fotovoltaico

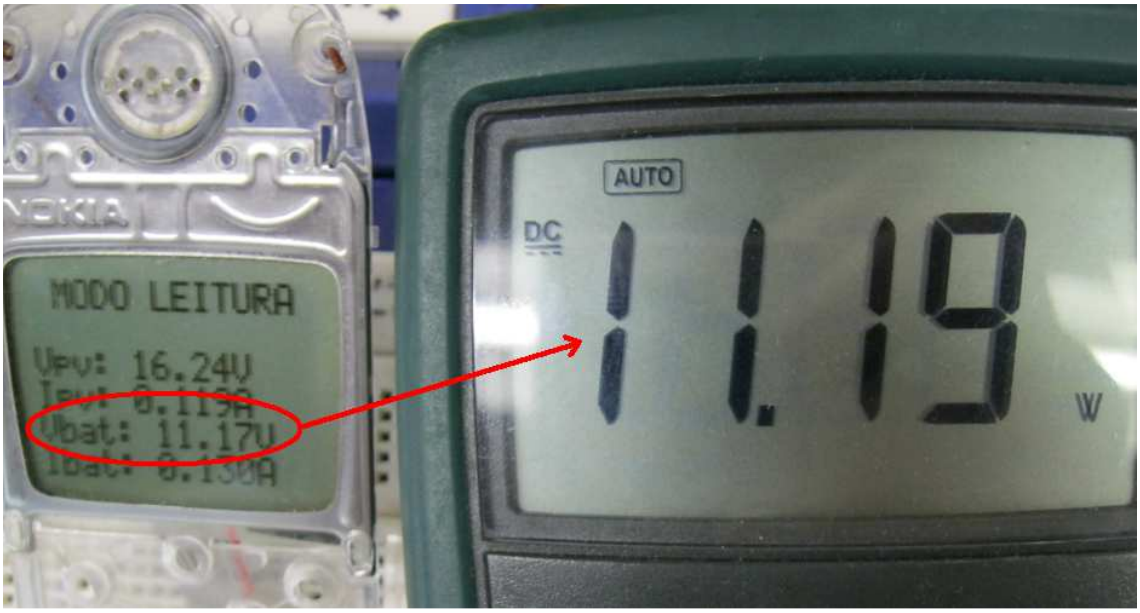


Figura 5.22 – Medição do valor da tensão aos terminais da bateria

5.3.4.2. Sensor de Corrente de Efeito Hall

Os sensores de corrente de efeito *Hall* utilizados para a medição dos valores da corrente provenientes do painel solar e da corrente na bateria foram os LA55-P da LEM. A Figura 5.23 apresenta a aparência destes sensores.

Figura 5.23 - Sensor de corrente de efeito *Hall* LA55-P da LEM

Este sensor tem capacidade de leitura máxima de valores de corrente até 50A (corrente nominal no primário do sensor). A corrente nominal no secundário do sensor é de 50mA, o que corresponde a uma razão de conversão de 1:1000. Assim como o sensor de tensão LV55-P, este sensor de corrente também pode ser alimentado com: -15V, GND, +15V ou -12V, GND, +12V [62]. A Figura 5.24 caracteriza o esquema de ligações empregue para os sensores de corrente.

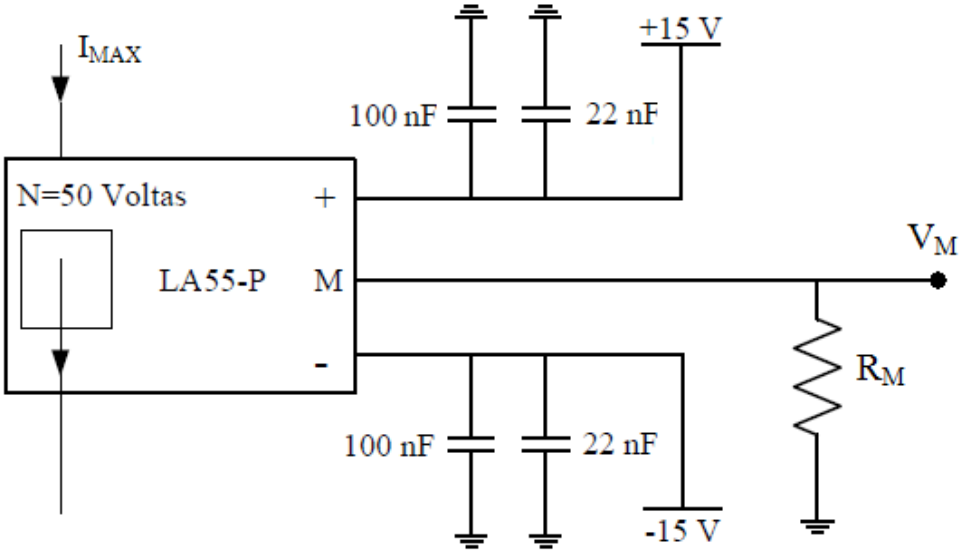


Figura 5.24 - Esquema de ligações do sensor de corrente LA55-P

Tal como no sensor de tensão, a resistência R_M deve ser projectada para o nível desejado no terminal M, sendo o valor máximo da tensão 5V (limite de tensão nas entradas do PIC18F4431) e também que nesse terminal a corrente não ultrapasse os 50mA. Assim, a equação (5.6) permite calcular R_M tanto para o circuito de medida da corrente proveniente do painel e da corrente na bateria.

$$R_M = \frac{V_M}{I_{SN}} = \frac{5V}{50mA} = 100\Omega \qquad (5.6)$$

Para se obter maior precisão na medição de valores baixos de corrente foi útil adicionar 50 espiras no primário do sensor. Desta forma, a relação de proporcionalidade da corrente do primário (I_{PN}) para o secundário (I_{SN}) depende do número de espiras no primário e é dada pela equação (5.7).

$$\frac{I_{PN}}{I_{SN}} = \frac{1000}{N\ (nº\ enrolamentos)} \qquad (5.7)$$

A Figura 5.25 mostra o resultado da medição da corrente proveniente do painel fotovoltaico, verificando-se a precisão da leitura. No caso da corrente na bateria apresenta-se a Figura 5.26 com uma amostra da leitura efectuada pelo sensor de corrente.

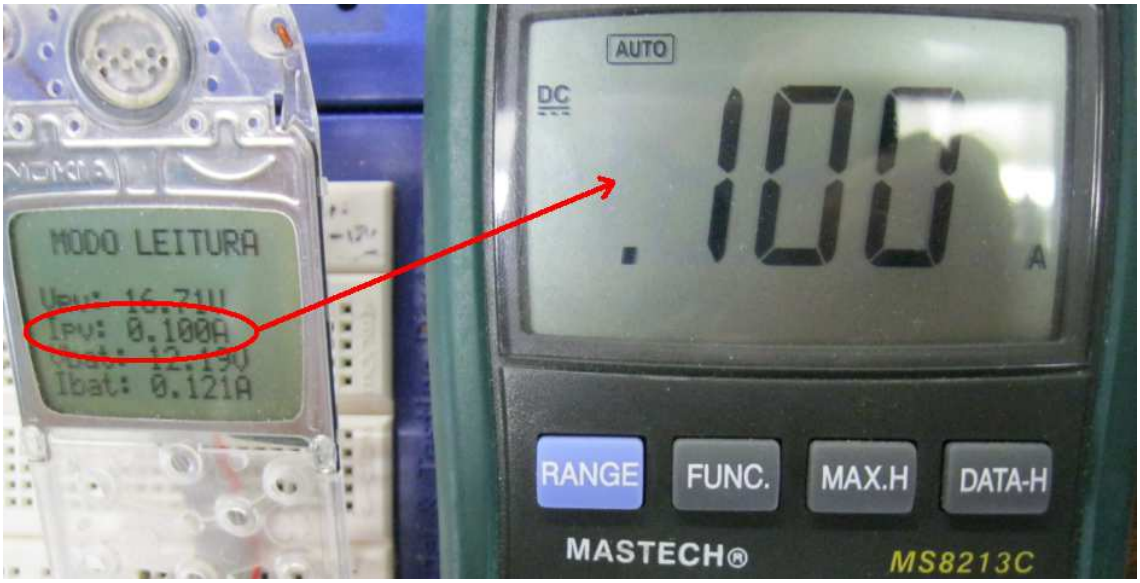


Figura 5.25 – Medição do valor da corrente proveniente do painel fotovoltaico

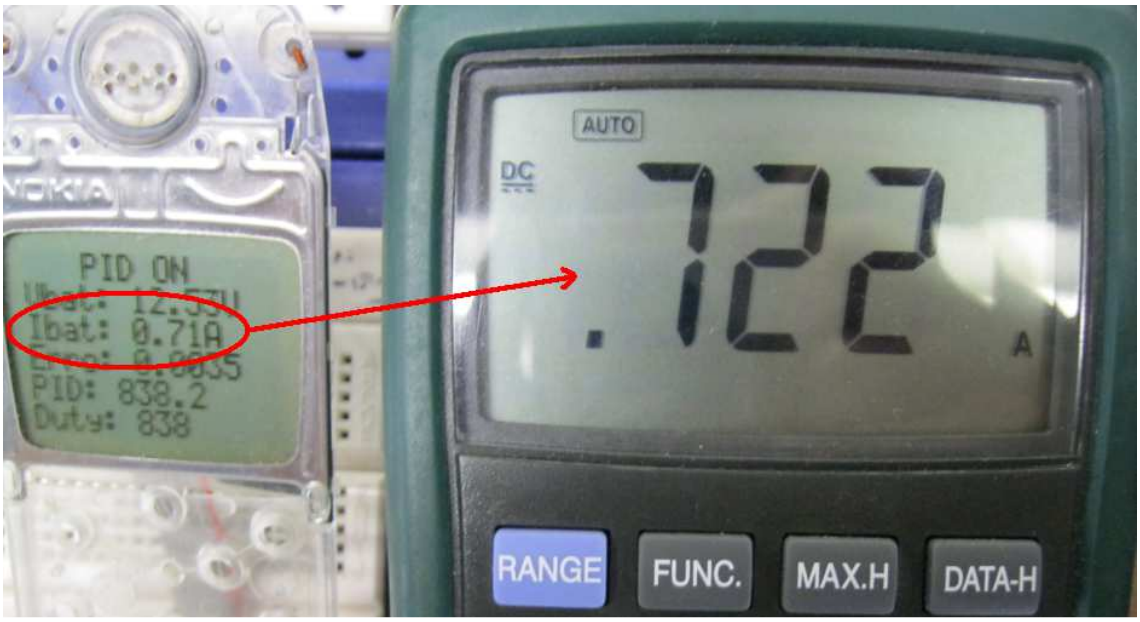


Figura 5.26 – Medição do valor da corrente que efectua o processo de carga da bateria

5.4. Conversor CC-CC *Step-Down*

A potência eléctrica gerada pelo módulo fotovoltaico é transferida para o barramento CC através de um conversor *step-down*. Como referido no Capítulo 3, o conversor *step-down* apresenta uma tensão de saída menor que a tensão de entrada. No ponto 3.4.3.2 desse capítulo foram calculados e dimensionados os componentes que compõem o conversor CC-CC *step-down* para a condição

mais crítica sofrida pelo conjunto painel solar – bateria. A Tabela 5.2 apresenta a diferença entre o valor dos componentes dimensionados e utilizados na simulação efectuada no Simulink com o valor dos componentes utilizados na implementação prática.

Tabela 5.2 – Valor dos componentes do *Step-Down* utilizados nas simulações e implementação prática

Componentes	**Valores utilizados nas simulações**	**Valores utilizados experimentalmente**
Condensador de entrada (C_1)	7,7µF	10 µF (electrolítico)
Condensador de saída (C_2)	4,3µF	4,7µF (polipropileno)
Bobina (L)	1,37mH	1,58mH

Além dos componentes calculados, o conversor *step-down* contém ainda um semicondutor de potência e um díodo. O díodo utilizado foi o SB2060CT e o semicondutor de potência o MOSFET STP12NM50, que apresenta como principais características uma tensão máxima *drain-source* de 500V, uma corrente máxima pulsada na *drain* de 12A e uma resistência *drain-source* (R_{ds}(on)) de 0,32Ω.

A Figura 5.27 mostra a implementação prática do conversor *step-down*, onde se pode verificar todos os componentes anteriormente descritos.

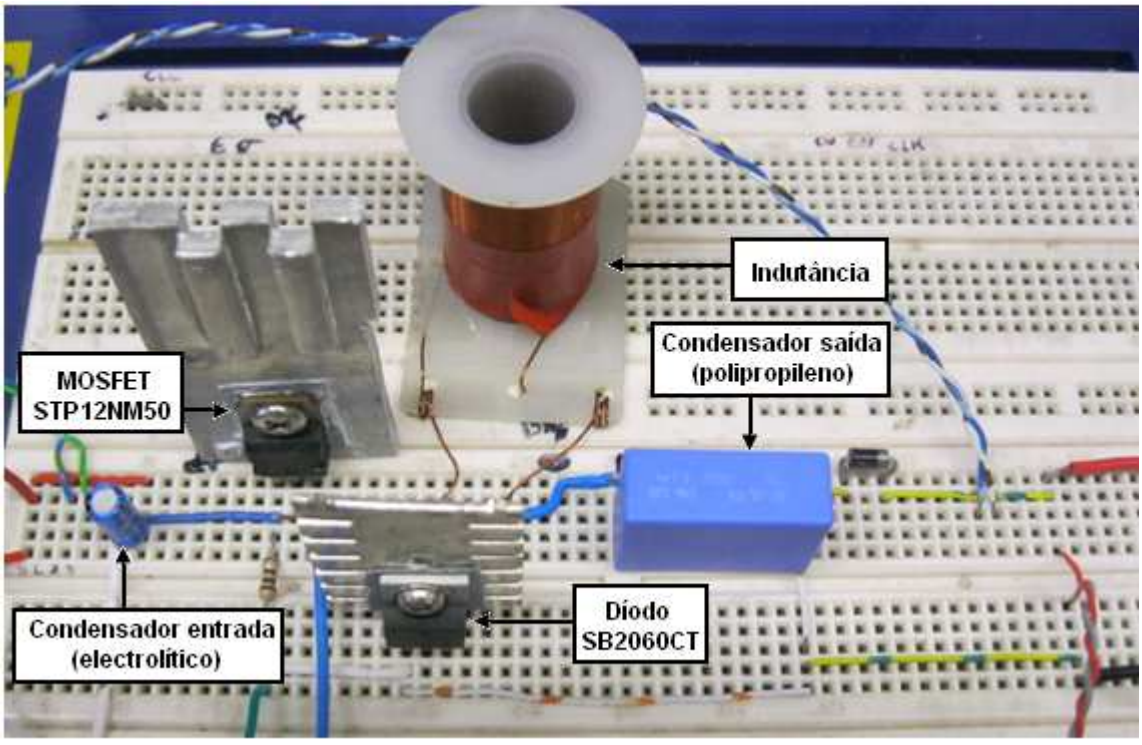


Figura 5.27 - Conversor CC-CC *Step-Down* implementado numa *breadboard*

Para comprovar o funcionamento do conversor *step-down* foi realizado um ensaio experimental com uma carga resistiva, na saída do conversor, de aproximadamente 100Ω. A tensão de entrada aplicada ao *step-down* foi de 16,8V, correspondente ao valor da tensão de máxima potência do painel BP SX30U. Aplicando um sinal PWM com um *duty-cycle* de 70% a uma frequência de 20kHz, como mostra a Figura 5.28, verifica-se à saída do conversor CC-CC uma tensão de 12V, que corresponde ao valor nominal da bateria.

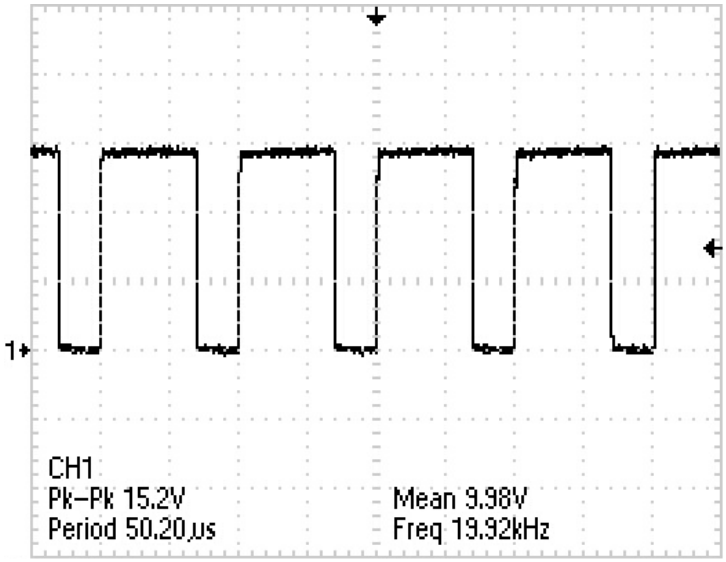


Figura 5.28 - Sinal de controlo PWM com *duty-cycle* 70% a uma frequência de 20kHz

A Figura 5.29 apresenta o valor eficaz da tensão de entrada e de saída do conversor *step-down*, que funciona como conversor abaixador de tensão.

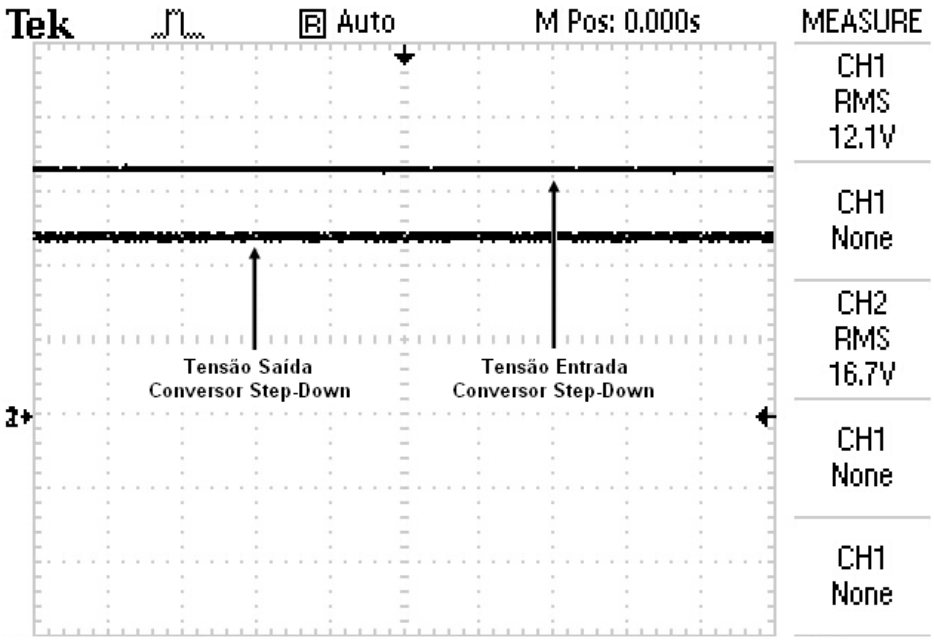


Figura 5.29 – Tensão na entrada e saída do conversor *Step-Down*

A tensão proporcional à corrente na bobina (i_L) à frequência do sinal PWM gerado pelo microcontrolador, ou seja, 20kHz é mostrada na Figura 5.30. Para efectuar a medição do valor de tensão proporcional à corrente foi utilizada uma resistência de potência, de valor 1Ω, em série com a bobina. Assim, pela lei de Ohm (U=RI), o valor de tensão amostrado é numericamente igual ao valor real da corrente.

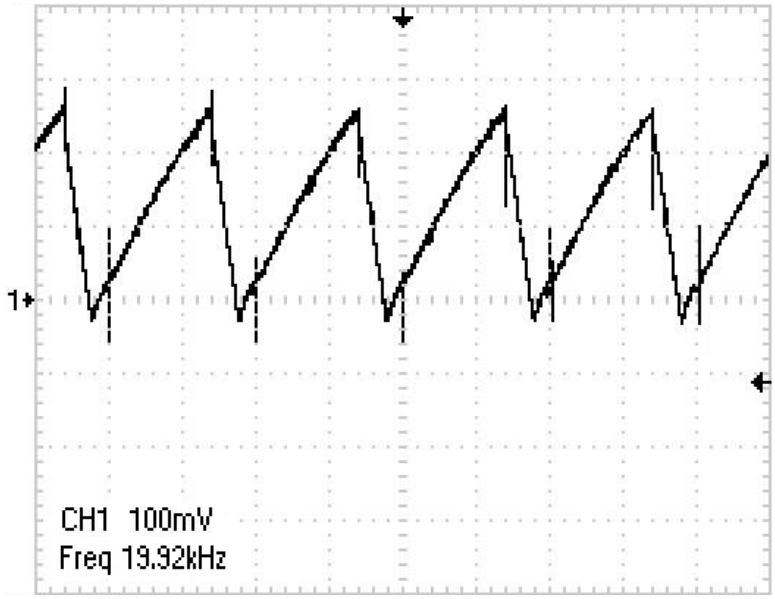


Figura 5.30 – Tensão proporcional à corrente na bobina (I_L)

A Figura 5.31 apresenta tensão *drain-source* (V_{DS}) do MOSFET, enquanto a Figura 5.32 mostra a tensão aos terminais do díodo (V_D). É evidente a alternância de condução dos dois dispositivos.

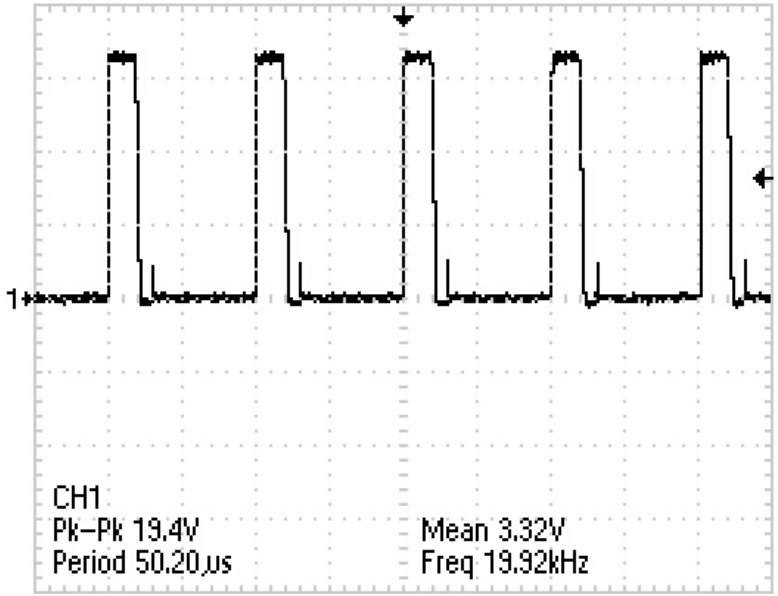


Figura 5.31 – Tensão *drain-source* do MOSFET (V_{DS})

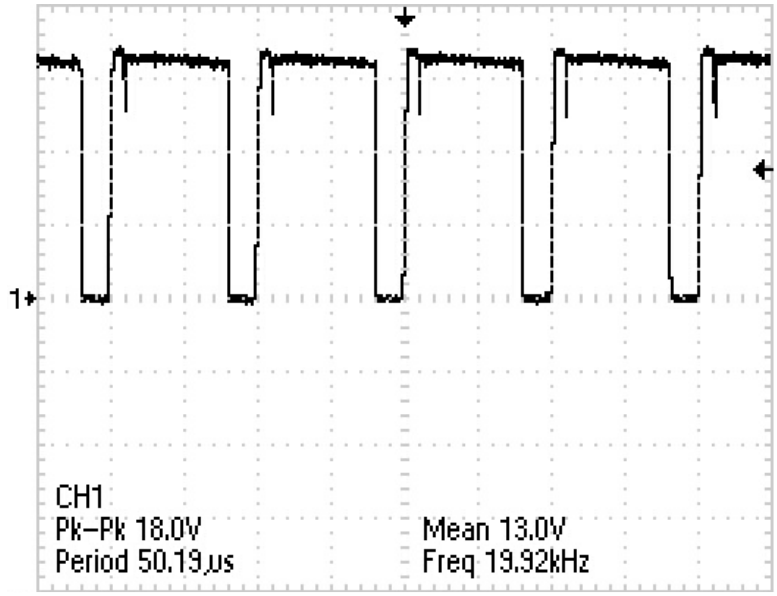


Figura 5.32 – Tensão no díodo (V_D)

5.5. Circuito MPPT

A curva característica I-V dos painéis solares fotovoltaicos, representada na Figura 5.33, apresenta um ponto onde o produto da tensão pela corrente é máximo. A técnica de controlo MPPT, Perturbação & Observação, aplicada ao conversor *step-down* procura constantemente este ponto (MPP).

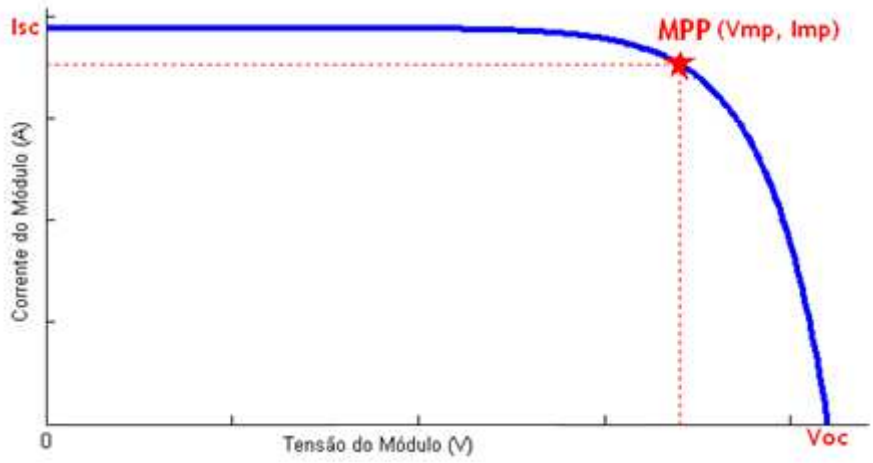


Figura 5.33 – Curva característica I-V de um painel solar

Contudo, em virtude de utilizar uma fonte de tensão constante para emular o painel fotovoltaico a curva característica I-V não exibe as características típicas mostradas na Figura 5.33. Para solucionar este problema e verificar o funcionamento do controlo MPPT foi necessário incluir uma resistência em série com a fonte de tensão. Esta resistência apresenta um

valor da mesma ordem de grandeza da carga do conversor *step-down*, de forma a limitar a potência fornecida pela fonte para que a curva I-V do conjunto fonte e resistência se aproxime da curva I-V de um painel fotovoltaico, permitindo assim testar o controlo MPPT implementado no PIC18F4431 e aplicado ao conversor. Assim, a curva I-V do conjunto fonte e resistência apresenta uma característica semelhante à da Figura 5.34.

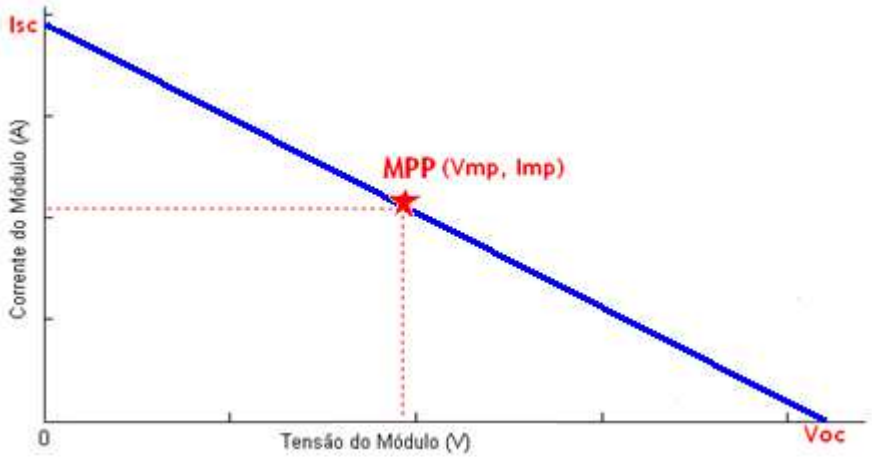


Figura 5.34 – Curva I-V do conjunto fonte de tensão e resistência

Para se verificar o funcionamento do circuito MPPT colocou-se o controlo a actuar em malha fechada, até que o valor do *duty-cycle* do sinal PWM a aplicar ao MOSFET do conversor estabilize, em regime permanente, em torno do MPP. Devido ao valor da perturbação, que traduz num aumento ou diminuição de 1% do valor do *duty-cycle*, o ponto de máxima potência não é atingido, oscilando o sistema em torno deste com o *duty-cycle* a variar entre 53% e 55%, como apresenta a Figura 5.35.

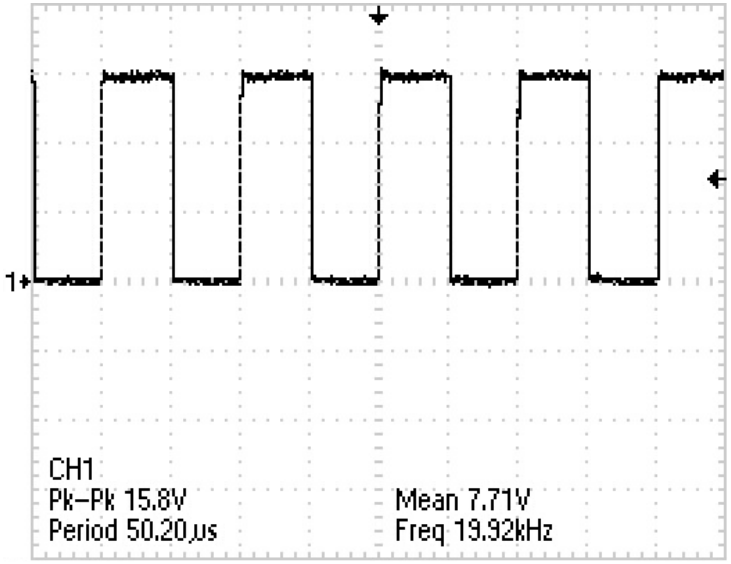


Figura 5.35 – Sinal PWM de *duty-cycle* de 53% no ponto de máxima potência

Nas condições referidas, ou seja, com o sistema de controlo MPPT a funcionar em malha fechada, com um *duty-cycle* a variar entre 53% e 55% o conversor *step-down* apresenta à entrada um valor de 11,7V, como ilustra a Figura 5.36(a) e uma corrente de 113mA, como mostra a Figura 5.36(b) (tensão proporcional). Perante estes valores de tensão e corrente, o *step-down* tem na sua entrada uma potência de 1,32W, proveniente do conjunto fonte de tensão e resistência, que emula o painel fotovoltaico.

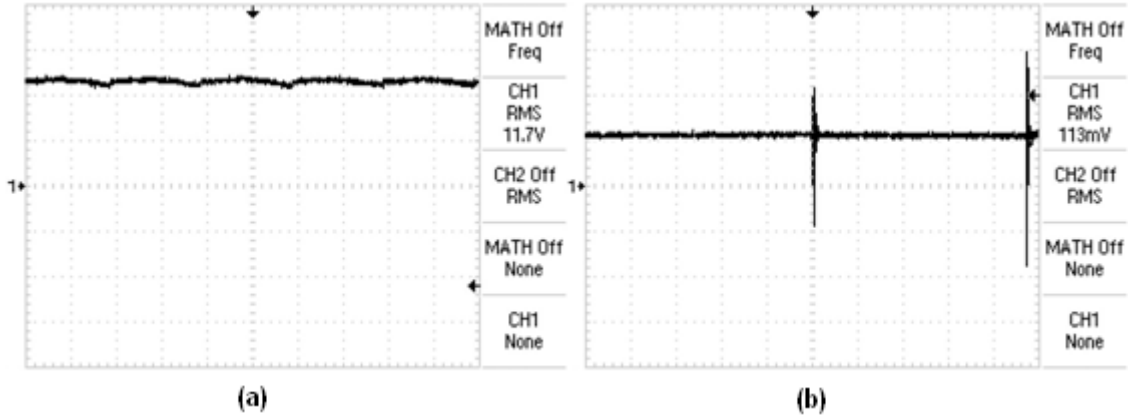


Figura 5.36 – Valores à entrada do conversor *step-down* com um sinal PWM de *duty-cycle* 53%: (a) tensão; (b) tensão proporcional à corrente

Seguidamente, para averiguar se realmente o sistema está a rastrear o MPP, colocou-se o sistema a funcionar em malha aberta com um sinal PWM fixo, no qual se efectuaram ensaios com um valor de *duty-cycle* inferior e superior ao verificado no ensaio com controlo em malha fechada. Para ambos os ensaios é esperada uma potência inferior à entrada do conversor *step-down*.

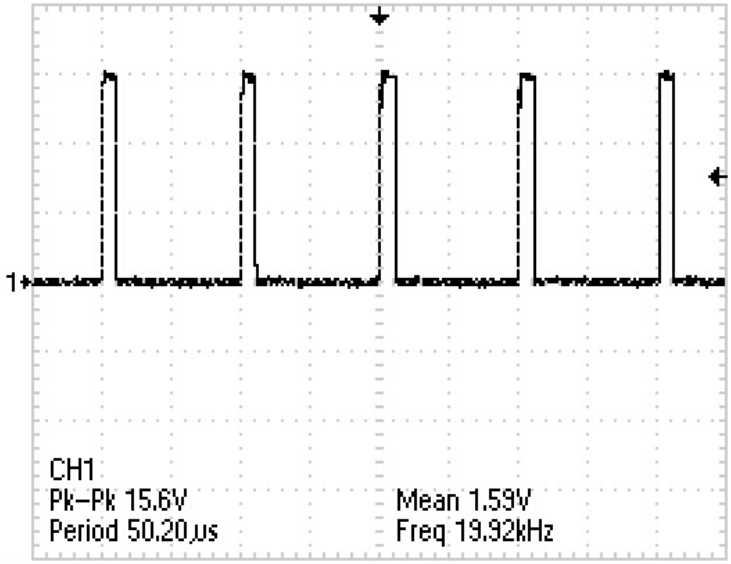


Figura 5.37 - Sinal PWM de *duty-cycle* de 10% abaixo do ponto de máxima potência

Com o sistema de controlo a funcionar em malha aberta, com um sinal PWM fixo, de *duty-cycle* 10% (Figura 5.37), ou seja, de valor inferior ao verificado no sistema com controlo em malha fechada, sendo que o conversor CC-CC *step-down* expõe à entrada um valor de 25,9V, como mostra a Figura 5.38(a), e uma corrente de 21,8mA, como se verifica pela Figura 5.38(b) (tensão proporcional). Estes valores provêem da fonte de tensão em série com a resistência e apresentam uma potência de 0,56W.

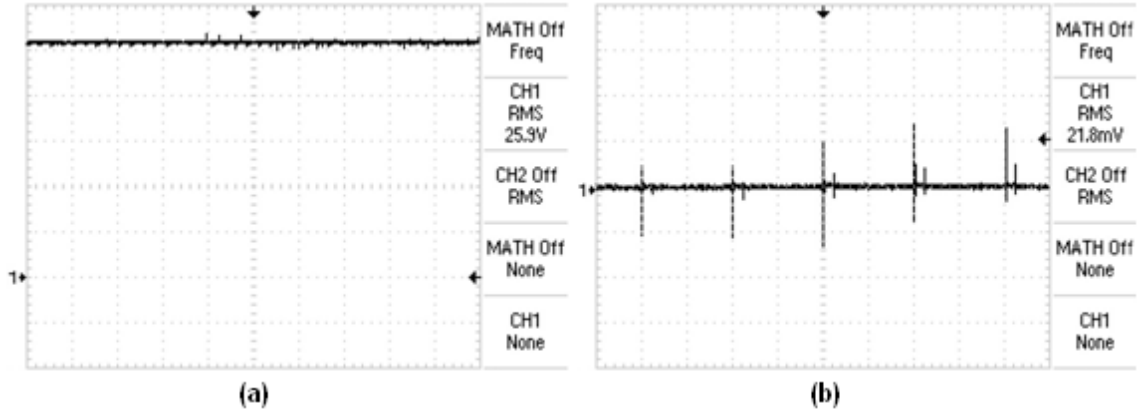


Figura 5.38 - Valores à entrada do conversor *step-down* com um sinal PWM de *duty-cycle* 10%: (a) tensão; (b) tensão proporcional à corrente

Ainda com o sistema a funcionar em malha aberta, alterou-se o *duty-cycle* do sinal PWM para 90% (Figura 5.39), ou seja, com um valor superior ao verificado no sistema com controlo em malha fechada.

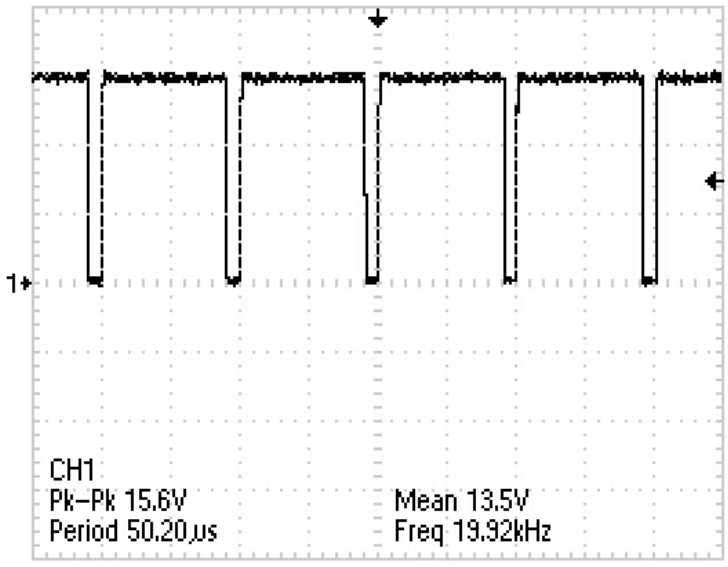


Figura 5.39 - Sinal PWM de *duty-cycle* de 90% acima do ponto de máxima potência

Nestas circunstâncias, o conversor *step-down* apresenta à entrada uma tensão de 5,59V, como prova a Figura 5.40(a), e uma corrente de 153mA, como ilustra a Figura 5.40(b), o que resulta numa potência de 0,86W.

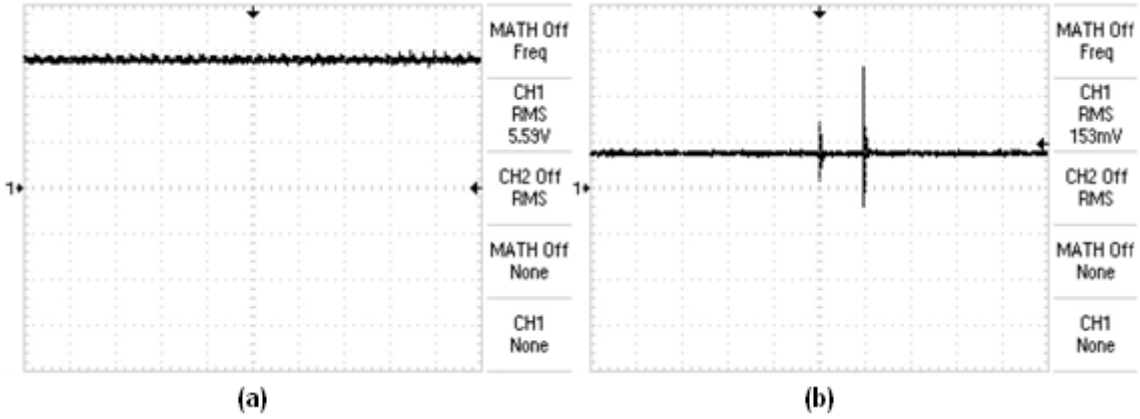


Figura 5.40 - Valores à entrada do conversor *step-down* com um sinal PWM de *duty-cycle* 90%: (a) tensão; (b) tensão proporcional à corrente

Com a impossibilidade de utilizar um painel fotovoltaico utilizou-se uma fonte de tensão em série com uma resistência da mesma ordem de grandeza da carga à saída do conversor, como referido anteriormente. Assim, devido a esta situação limitou-se a corrente e consequentemente a potência fornecida ao conversor CC-CC *step-down*, com os ensaios realizados a apresentar valores de baixa potência, quando comparados com os valores a utilizar no sistema de iluminação. Contudo, estes valores de potência servem para comprovar o bom funcionamento do circuito de controlo MPPT.

No ensaio com o sistema de controlo MPPT a funcionar em malha fechada o conversor *step-down* apresenta na sua entrada uma potência de 1,32W com um sinal PWM de *duty-cycle* variável entre 53% e 55%. Em malha aberta, com um sinal PWM de *duty-cycle* fixo de 10% a potência é 0,56W, enquanto com um *duty-cycle*, também fixo, de 90% a potência é 0,86W. Assim, perante estes valores, demonstra-se que o circuito a funcionar com o controlo MPPT em malha fechada procura o ponto de máxima potência da curva I-V, da Figura 5.34, ficando a oscilar em torno deste devido à utilização da técnica Perturbação & Observação.

5.6. Controlador de Carga Baseado no Conversor *Step-Down*

O controlador de carga é desenvolvido para garantir que a bateria funciona em condições apropriadas. Este evita sobrecargas ou descargas excessivas da bateria, circunstâncias que diminuem a vida útil da mesma. De

maneira a providenciar a carga e descarga apropriada da bateria, o controlador regista frequentemente o estado de carga (SOC), que é estimado com base nos valores de tensão da bateria. Com base nos níveis de tensão da bateria utilizada na dissertação, Figura 5.41, definem-se alguns níveis de corrente que devem ser respeitados para um bom processo de carga. Estes valores estão representados na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 – Parâmetros para uma bateria de 12V e 7,2 Ah.

Descrição	**Valores**
Corrente mínima da bateria (I_{TRIC})	72 mA
Corrente máxima da bateria (I_{BLK})	0,72 A
Corrente de retenção ($I_{BLK\,/\,5}$)	144 mA
Tensão máxima da bateria (V_{FLOAT})	14,4 V
Tensão mínima da bateria (V_{OFF})	10,5 V
Tensão máxima de valor de sobrecarga (V_{OCT})	13,5 V

A corrente máxima permitida para o carregamento da bateria (I_{BLK}) é habitualmente definida como 10% da capacidade nominal da mesma, para protecção da bateria contra sobreaquecimento. Esta corrente é aplicada até a bateria atingir um valor de tensão de sobrecarga (V_{OCT}). A corrente mínima (I_{TRIC}), também conhecida como corrente de flutuação, é assente em 1% da capacidade nominal da bateria.

Figura 5.41 – Bateria BT-12M7.2AT da Baote utilizada na dissertação

O fluxograma da Figura 5.42 representa a sequência de acções de controlo que são executadas para providenciar um correcto processo de carga

da bateria de ácido chumbo. Antes de se começar este processo, o PIC18F4431 é iniciado com as variáveis, valores e módulos imprescindíveis para desenvolver tudo o funcionamento e monitorização do sistema. O valor da corrente (I_{BAT}) e da tensão (V_{BAT}) da bateria são medidas através do módulo ADC em modo de leitura simultânea para que ambas as grandezas sejam calculadas ao mesmo tempo. É definido o valor mínimo e máximo do *duty-cycle* a aplicar ao MOSFET do conversor *step-down*, com o módulo PWM iniciado com uma frequência de 20kHz.

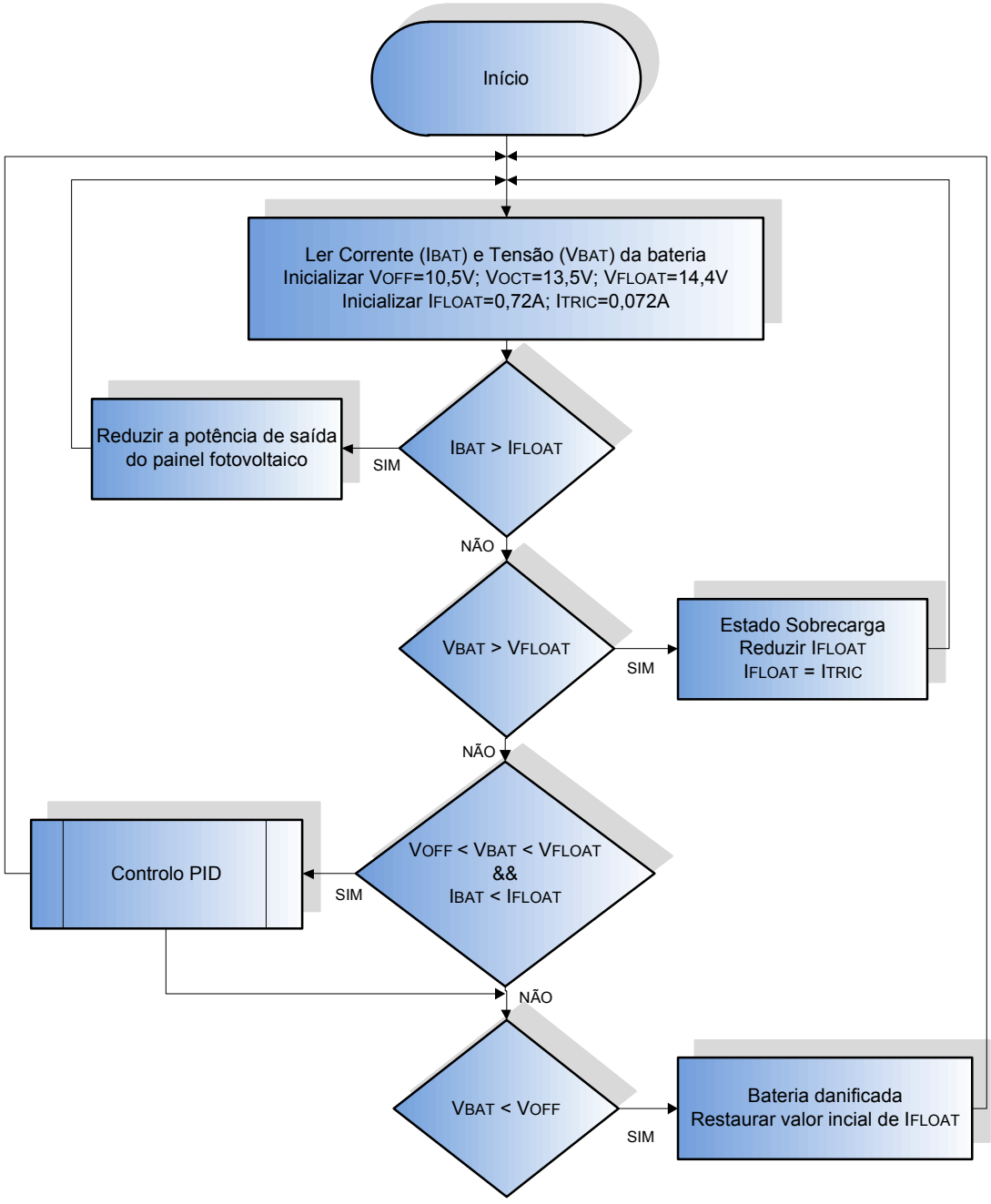


Figura 5.42 – Conjunto de instruções para efectuar o processo de carga da bateria

Caso a corrente na bateria (I_{BAT}) apresente um valor superior à corrente definida para o carregamento (I_{FLOAT}) é necessário reduzir a potência proveniente do painel fotovoltaico para reduzir a corrente de forma a evitar danificar a bateria. Para isso, é reduzido o *duty-cycle* do sinal PWM a aplicar os MOSFET do conversor *step-down*.

O controlo do processo de carga limita as tensões a que está submetida a bateria, aumentando assim o seu ciclo de vida, mas se a tensão da bateria (V_{BAT}) sobe acima do nível de tensão máxima (V_{FLOAT}), o que significa que está em sobrecarga, a corrente a aplicar à bateria é reduzida para o valor de I_{TRIC}, correspondente a 1% da capacidade nominal, na iteração seguinte. Se a tensão na bateria for abaixo do nível mínimo (V_{OFF}) significa que a bateria está danificada e necessita ser substituída para o sistema continuar a operar.

Sempre que os limites de tensão da bateria se situarem nos valores especificados pelo fabricante, ou seja, entre o valor mínimo (V_{OFF}) e máximo (V_{FLOAT}), a bateria vai estar permanentemente sob controlo rigoroso, com base no método dos 3 estágios, como referido no ponto 3.3.2.5. A operação do processo de carga da bateria efectua o controlo às grandezas I_{FLOAT} (estágio 1), V_{FLOAT} (estágio 2), V_{OCT} (estágio 3), dependendo do estágio em que o carregador está a funcionar. Desta forma, para realizar o controlo destas grandezas foi implementado um controlador PID digital. Devido à simplicidade e precisão, este tipo de controlador é provavelmente o mais utilizado em processos industriais. A equação (5.8) define a função de transferência do controlador PID [63].

$$G_C(s) = K_P \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s\right) \tag{5.8}$$

Onde: K_P é o ganho proporcional, T_i a constante de tempo integral e T_d a constante de tempo derivativo.

O objectivo deste tipo de controladores é aproveitar a combinação das características das acções proporcional, integral e derivativa de forma a obter uma melhoria significativa no comportamento transitório e em regime permanente do sistema controlado. O controlo de processos por realimentação negativa envolve duas acções: o erro, que resulta da comparação do valor da variável medida com o valor de referência e o estabelecimento da acção de controlo propriamente dita, com base em algoritmos pré-definidos.

Considerando e(t) o erro e a entrada do controlador PID, a saída u(t) do controlador é definida na equação (5.9).

$$u(t) = K_P \left[e(t) + \frac{1}{Ti} \int_{-\infty}^{0} e(t)\, dt + Td\, \frac{de(t)}{dt} \right] \tag{5.9}$$

A estrutura paralela do controlador PID está caracterizada no diagrama de blocos da Figura 5.43, onde E(s) representa o erro e U(s) a saída do controlador. A acção proporcional é sempre utilizada, enquanto as acções integral e derivativa complementam juntas ou separadamente essa acção.

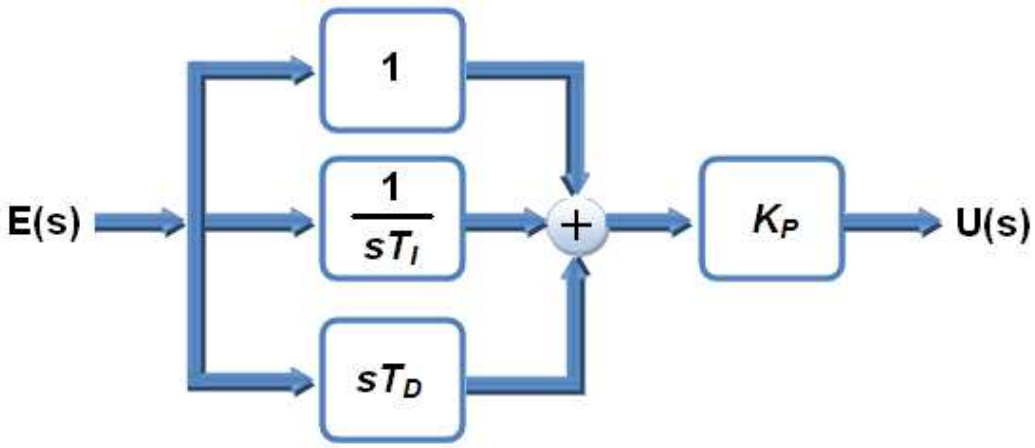


Figura 5.43 – Diagrama de blocos do controlador PID paralelo [64]

A crescente aplicação de sistemas digitais em controlo de processos, juntamente com a referida precisão dos algoritmos de controlo PID, levou à criação da versão digital desses mesmos algoritmos. A implementação digital do controlador PID pode ser feita com aproximações numéricas do integral e da derivada do erro que compõe a lei de controlo. Para efectuar o processo de carga da bateria utilizou-se o algoritmo de controlo PID discreto de velocidade, equação (5.10). Esta equação descreve as operações matemáticas a serem programadas no PIC18F4431. O algoritmo velocidade calcula a variação do sinal de saída u(t) do controlador em relação ao instante imediatamente anterior.

$$\begin{aligned} u(t) = {} & u(t-1) \\ & + K_P[(e(t) - e(t-1)) + K_i\, e(t) \\ & + K_d(e(t) - 2e(t-1) + e(t-2))] \end{aligned} \tag{5.10}$$

Com base no método dos 3 estágios para o processo de carga da bateria, o controlo PID digital é efectuado em 3 situações distintas, como se verifica pelo fluxograma da Figura 5.44.

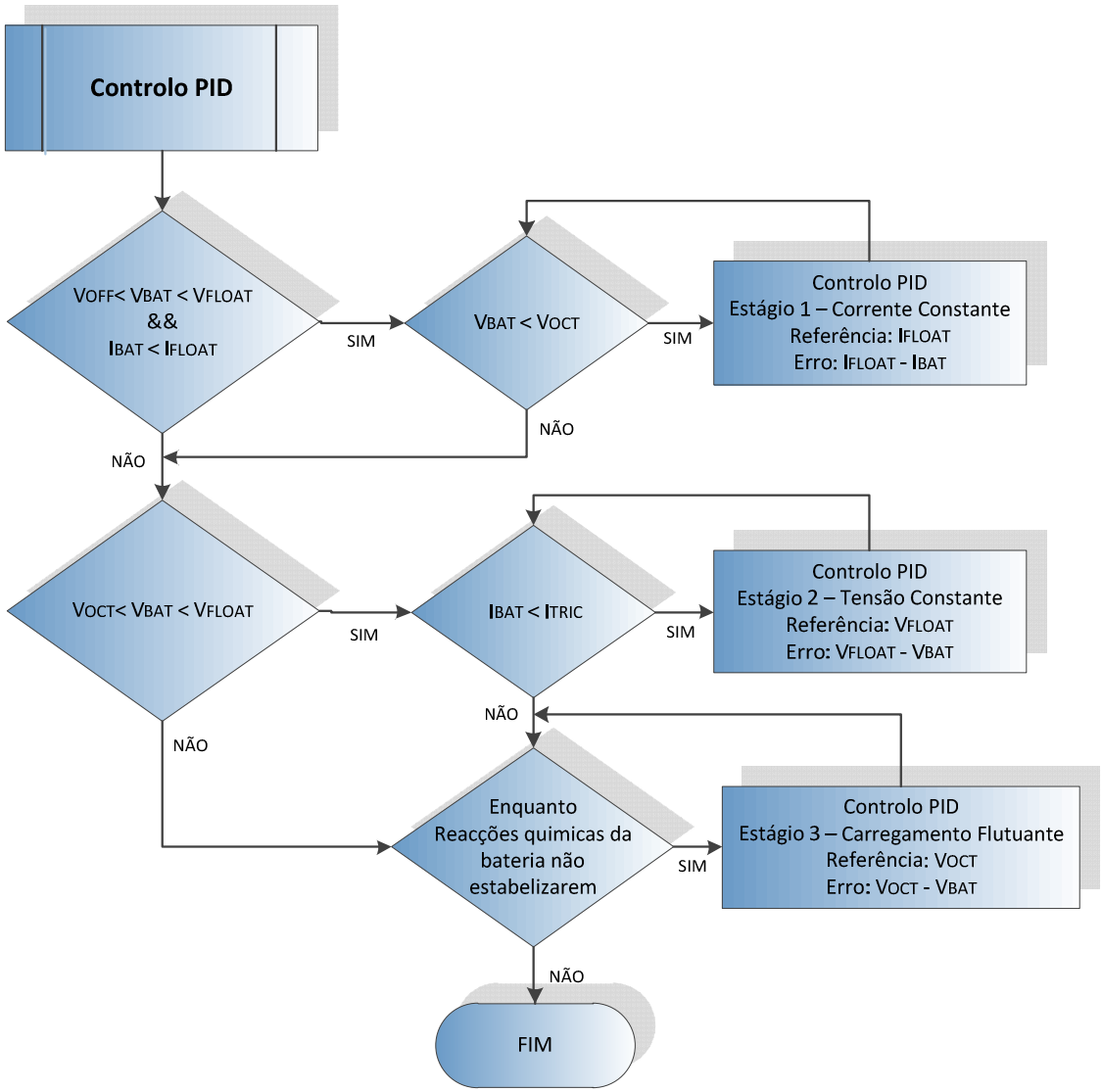


Figura 5.44 – Fluxograma representativo do controlo PID digital aplicado ao processo de carga da bateria baseado no método dos 3 estágios

Quando a bateria se encontra descarregada, o controlo PID é iniciado no estágio de corrente constante, com a indicação a surgir através de uma mensagem no LCD, como mostra a Figura 5.45. Neste estágio a grandeza a ser controlada é a corrente que carrega a bateria (I_{FLOAT}), controlada a partir do sinal PWM aplicado ao MOSFET do conversor *step-down*. A Figura 5.46 apresenta a colocação da corrente que carrega a bateria no valor de referência (0,72A) com a utilização de um reóstato na saída do *step-down*, enquanto a Figura 5.47 mostra a mesma colocação da corrente (I_{FLOAT}) mas com a utilização da bateria na saída do conversor. Analisando ambas as figuras

verifica-se que a corrente alcança e estabiliza mais rapidamente quando se encontra ligado à saída do conversor a bateria, existindo também uma maior oscilação.

Figura 5.45 – Mensagem de início do controlo PID para o 1º estágio (Corrente Constante) do processo de carregamento da bateria

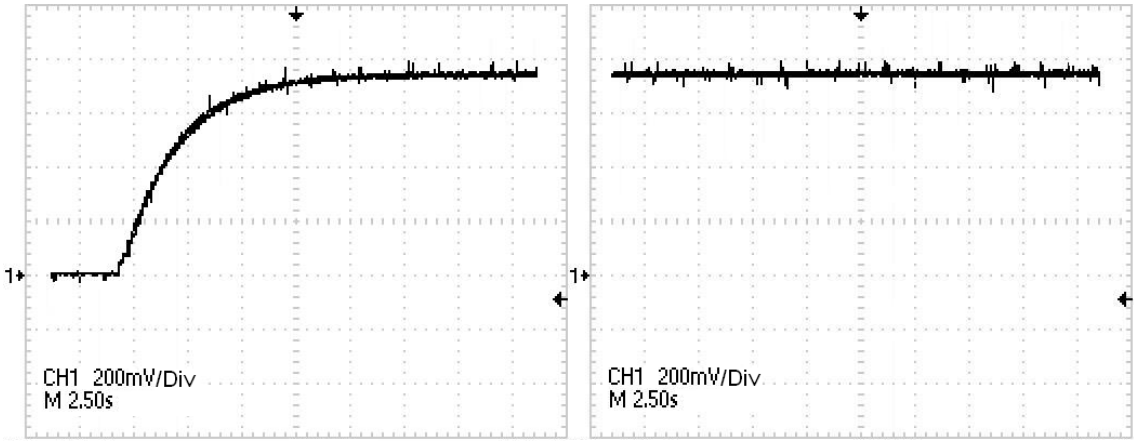


Figura 5.46 – Colocação da corrente I_{BLK} no valor de referência (0,72A) com a utilização de um reóstato na saída do conversor *step-down*

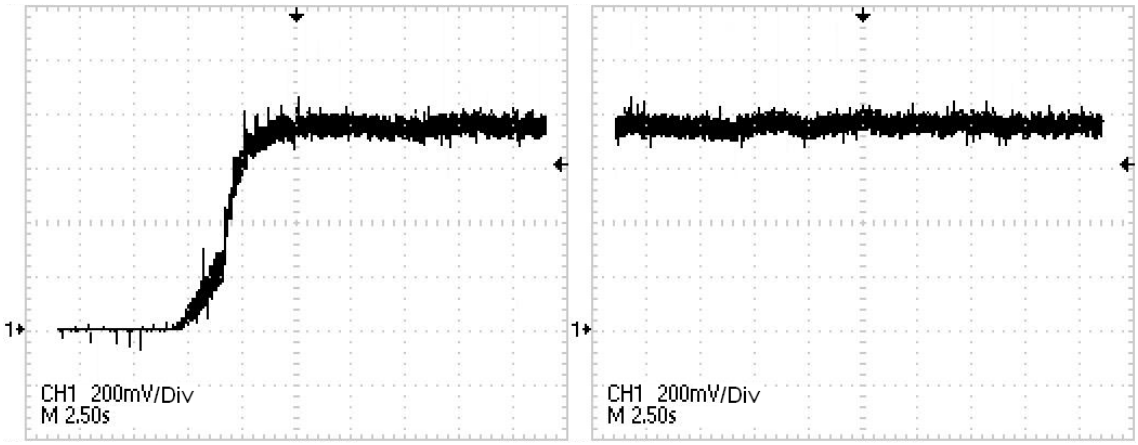


Figura 5.47 - Tensão proporcional à corrente que carrega a bateria (I_{BLK} = 0,72A)

A corrente depois de estabilizar no valor definido para o carregamento (0,72A), mantém-se constante até a tensão aos terminais da bateria (Figura 5.48) atingir o valor de 13,5V (V_{OCT}), como mostra a Figura 5.49.

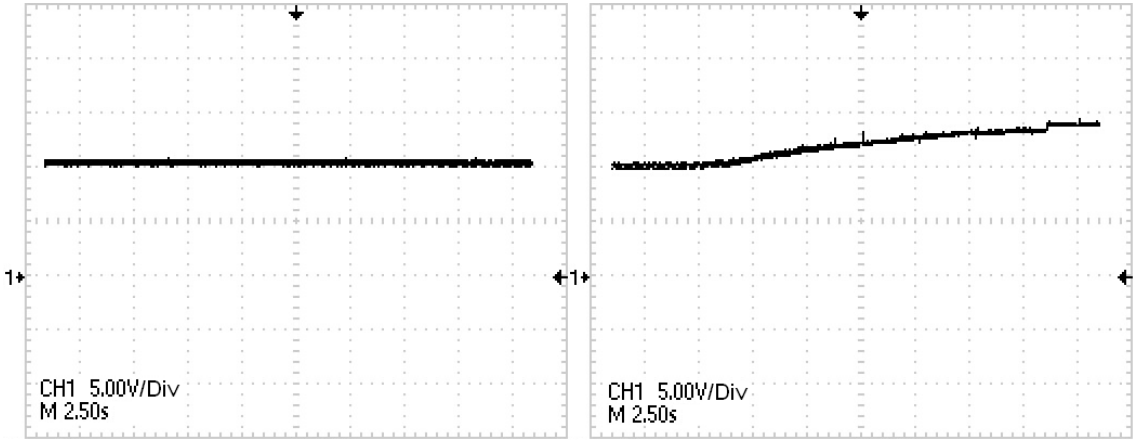


Figura 5.48 – Tensão aos terminais da bateria quando é aplicada a corrente I_{FLOAT} no 1º estágio do processo de carga da bateria

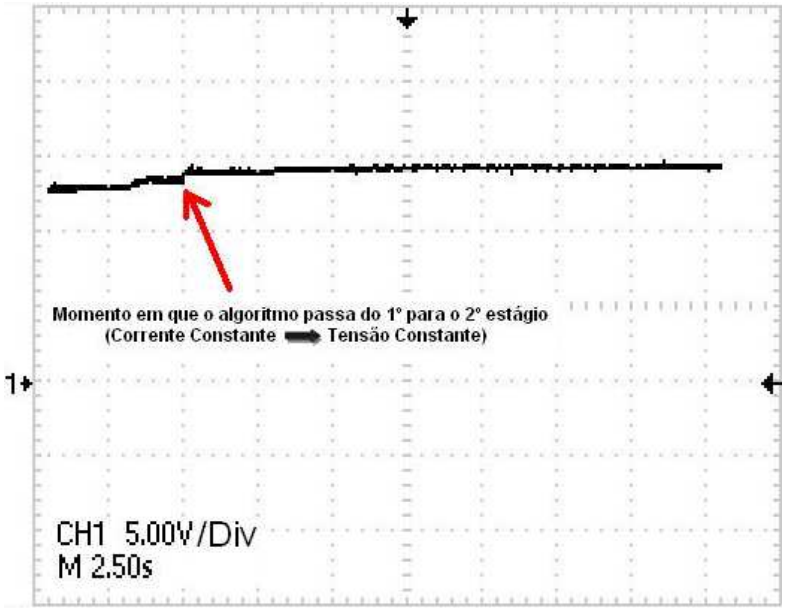


Figura 5.49 – Tensão aos terminais da bateria quando o algoritmo de controlo passa do 1º para o 2º estágio do processo de carga da bateria

De maneira a ser possível verificar a tensão na saída do conversor *step-down*, a Figura 5.48 e a Figura 5.49 mostram a ascensão da tensão aos terminais de um reóstato já que com a bateria na saída do conversor a subida da tensão é efectuada de maneira lenta, não possibilitando a percepção do crescimento no osciloscópio.

A Figura 5.50 ilustra uma sequência de mensagens amostrada no LCD durante o carregamento da bateria no 1º estágio. Pode verificar-se o

crescimento da tensão aos terminais da bateria (10,77V; 12,46V; 13,17V) com uma corrente constante de valor muito aproximado do valor de referência (I_{FLOAT}=0,72A).

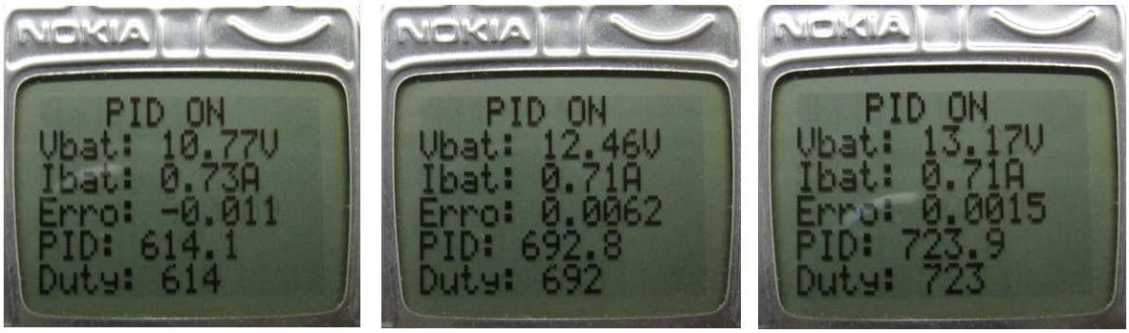


Figura 5.50 – Sequência de mensagens amostradas no LCD durante o estágio de corrente constante para o carregamento da bateria

.

Como referido anteriormente, a corrente assim que atinge o valor de referência mantém-se constante até a tensão aos terminais da bateria atingir o valor de 13,5V (V_{OCT}), passando o algoritmo para o 2º estágio (Figura 5.49), denominado de tensão constante, com a indicação a surgir através de uma mensagem no LCD, como mostra a Figura 5.51.

Figura 5.51 – Mensagem de início do controlo PID para o 2º estágio (Tensão Constante) do processo de carregamento da bateria

Neste estágio a grandeza a ser controlada é a tensão que carrega a bateria (V_{FLOAT}), com valor de referência de 14,4V, como mostra a Figura 5.52. Tal como no 1º estágio de carregamento, a grandeza a ser controlada, no caso V_{FLOAT}, é a partir do sinal PWM aplicado ao MOSFET do *step-down*. Enquanto é aplicada uma tensão constante para o carregamento a corrente na bateria irá diminuir, como mostra a Figura 5.53, até ao valor de I_{TRIC}.

A Figura 5.54 ilustra uma sequência de mensagens amostrada no LCD durante o carregamento da bateria no 2º estágio. Verifica-se a tensão aos

terminais da bateria a manter-se constante no valor de referência (V_{FLOAT}=14,4V) enquanto a corrente na bateria decresce (0,71A; 0,45A; 0,21A).

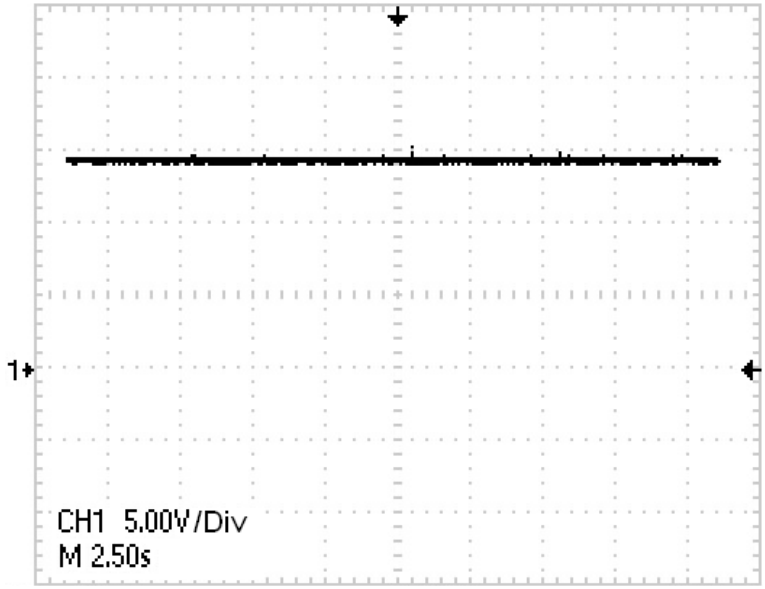


Figura 5.52 – Tensão aos terminais da bateria (14,4V) no 2º estágio do processo de carga

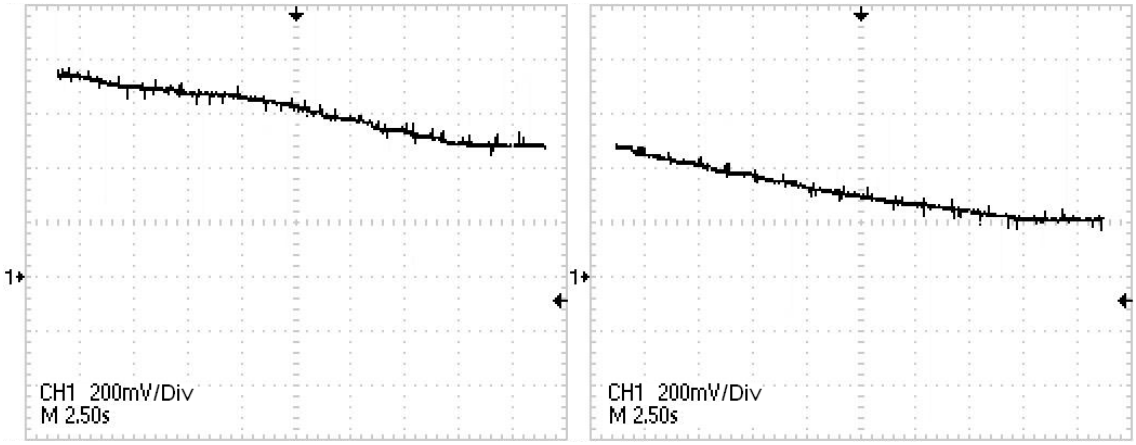


Figura 5.53 – Tensão proporcional à corrente na bateria no 2º estágio do processo de carga

Figura 5.54 - Sequência de mensagens amostradas no LCD durante o estágio de tensão constante para o carregamento da bateria

Assim que a corrente igualar o valor de I_{TRIC}, ou seja, 0,072 o algoritmo muda para o estágio final do carregamento da bateria, designado por carregamento flutuante. Nesta fase, tal como no estágio de tensão constante, é aplicada uma tensão constante um pouco inferior a 14,4V, no caso 13,5V, grandeza controlada pelo PID. Esta tensão é aplicada durante um intervalo de tempo de maneira a que as reacções químicas da bateria estabilizem.

5.7. Sistema de Iluminação - Matriz de LEDs

Com a finalidade de emular um sinal de trânsito com a utilização da tecnologia LED foi implementado numa *veroboard* uma matriz de LEDs constituída por 57 LEDs, 29 LEDs vermelhos e 28 LEDs de alto brilho brancos, que interpretam um sinal rodoviário de sentido proibido, como ilustra a Figura 5.56 e a Figura 5.57. A implementação da matriz de LEDs na *veroboard* teve como princípio o circuito eléctrico da Figura 5.55, que é composto por uma fonte de tensão (bateria de ácido chumbo 12V anteriormente referenciada nesta dissertação), e uma resistência de potência (R_{POT}) de 15W de 100Ω em série, com a ligação de LEDs em paralelo, para limitar os parâmetros de funcionamento para valores correctos.

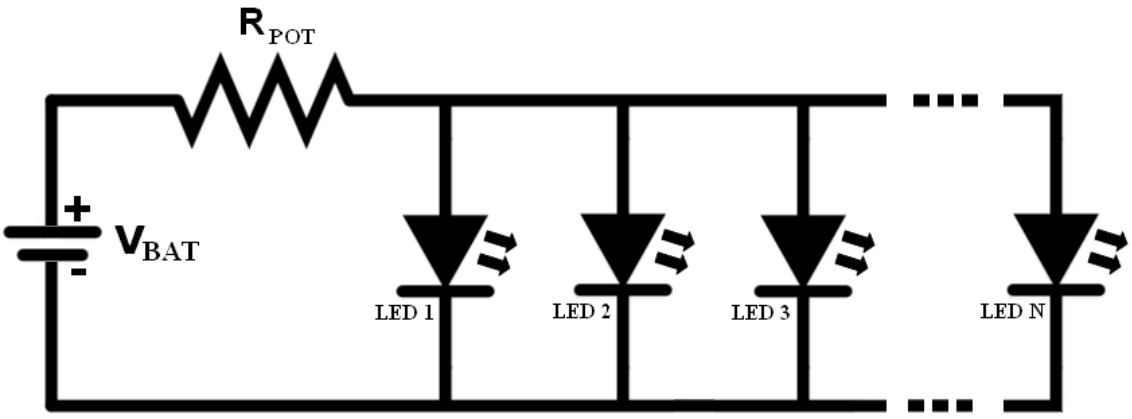


Figura 5.55 – Circuito eléctrico da matriz de LEDs

Como se tratam de conjuntos de LEDs diferentes (LEDs vermelhos e LEDs brancos de alto brilho) e devido à ligação em paralelo foi necessário dividir em dois a matriz de LEDs, ou seja, uma matriz para os LEDs brancos e outra para os vermelhos. Isto, porque os LEDs brancos apresentam uma tensão de funcionamento diferente dos vermelhos e caso fossem ligados em conjunto apenas os LEDs de menor tensão acenderiam e possivelmente de seguida ficariam destruídos.

O sinal de controlo PWM enviado pelo microcontrolador PIC18F4431 para controlar a luminosidade dos LEDs é efectuado através de um circuito acoplador que assegura os níveis de tensão da bateria a aplicar aos LEDs. Existiu a preocupação por aplicar um sinal PWM com um valor de *duty cycle* reduzido para que desta forma os LEDs se encontrem mais tempo desligados do que ligados para não causar encandeamento numa situação real rodoviária.

A Figura 5.56 e a Figura 5.57 ilustram o sinal rodoviário de sentido proibido equipado com a tecnologia LED implementado numa *veroboard*, quando os LEDs se encontram desligados e acesos, respectivamente.

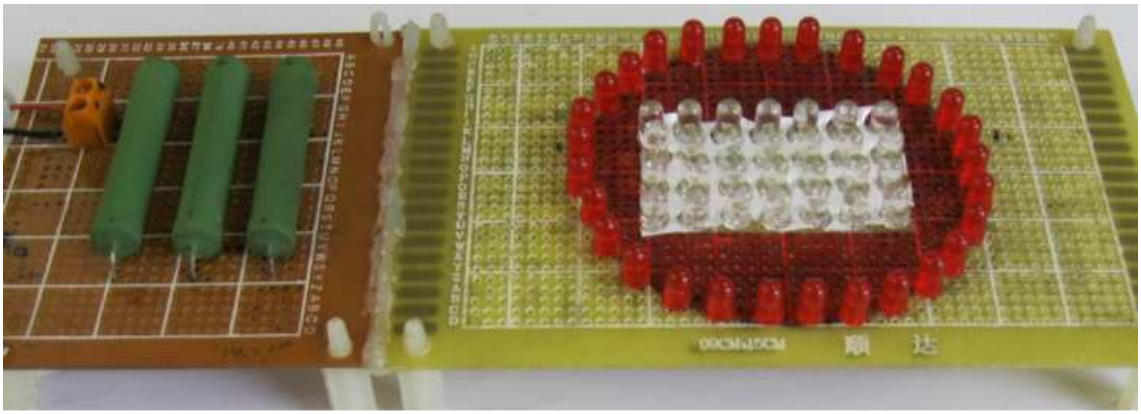


Figura 5.56 - Sinal rodoviário (sentido proibido) equipado com a tecnologia LED implementado numa *veroboard* com os LEDs apagados

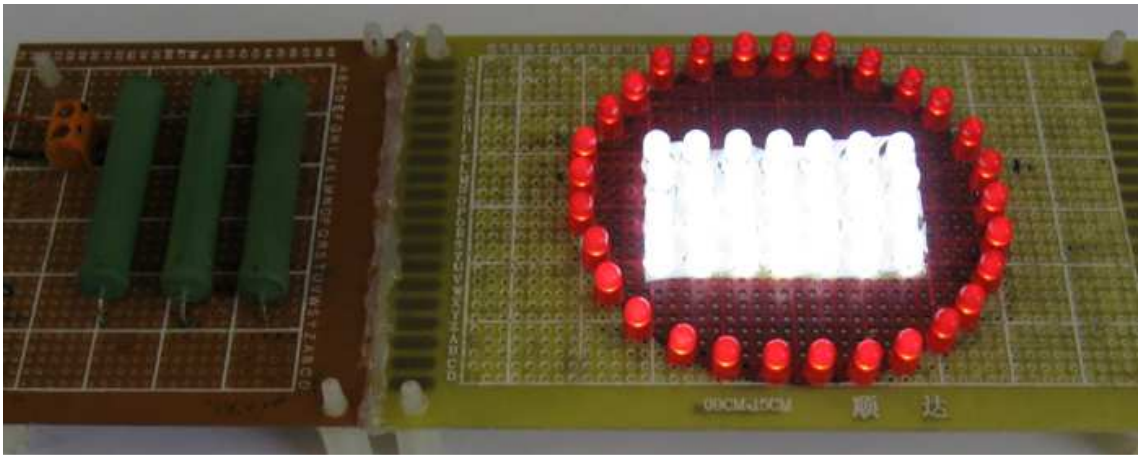


Figura 5.57 - Sinal rodoviário (sentido proibido) equipado com a tecnologia LED implementado numa *veroboard* com os LEDs acesos

5.8. Conclusões

Neste capítulo apresentaram-se e foram caracterizados todos os passos executados durante a implementação prática do sistema de iluminação de LEDs de alto brilho alimentado por um sistema fotovoltaico. Elaborou-se uma

descrição geral de todo o sistema implementado, destacando-se duas unidades diferentes. A unidade de comando é composta por vários circuitos que estão encarregues por todos os sinais de controlo gerados pelo microcontrolador PIC18F4431, dispositivo principal da unidade de comando. O conversor CC-CC *step-down*, que representa a unidade de potência, é o outro circuito central do sistema, que dependente do sistema de controlo que lhe é aplicado, através do sinal PWM aplicado ao MOSFET, realiza o rastreamento do ponto de máxima potência, através do circuito MPPT, efectua o processo de controlo de carga e descarga da bateria, através do controlador de carga, e executa o controlo de luminosidade dos LEDs do módulo de iluminação.

Para verificar e validar o funcionamento do *step-down* como conversor abaixador de tensão realizou-se um ensaio com controlo em malha aberta, ou seja, com sinal PWM fixo e pela análise dos resultados obtidos conclui-se que o conversor funciona conforme o esperado.

Com a utilização de uma fonte de tensão constante em detrimento do painel solar fotovoltaico, devido à indisponibilidade de painéis para os testes, surgiram problemas para validar o circuito MPPT. Para resolver esse inconveniente foi necessário incluir no sistema uma resistência, da mesma ordem de grandeza da carga do conversor *step-down*, em série com a fonte de tensão para desta forma se obter uma curva característica I-V parecida com as curvas características do painel fotovoltaico. Seguidamente realizaram-se vários ensaios com controlo em malha fechada, com vários algoritmos de seguimento MPP baseados na técnica de Perturbação & Observação. Verificou-se que o circuito MPPT efectuou a busca constante do ponto de máxima potência, oscilando o sistema em torno deste com um valor de *duty-cycle* variável. De seguida, para verificar se o sistema estava de facto a funcionar no ponto de máxima potência realizaram-se dois ensaios com controlo em malha aberta, com valor de *duty-cycle* fixo maior e menor que o valor de *duty-cycle* apresentado nos ensaios em malha fechada. Ambos os ensaios mostraram valores de potência inferiores ao ensaio com controlo em malha fechada, o que valida o funcionamento do circuito MPPT.

De forma a evitar sobrecargas ou descargas excessivas da bateria, para preservar a integridade da mesma, desenvolveu-se um controlador de carga baseado no método dos 3 ciclos de carga, ciclo de corrente constante, ciclo de tensão constante e ciclo de carregamento flutuante. Em cada ciclo deste processo de carga existem grandezas que devem ser minuciosamente

controladas, para que a bateria funcione em condições apropriadas e especificadas pelos fabricantes. Assim, para efectuar o controlo das grandezas em cada ciclo de carga foi desenvolvido um controlador PID digital que se apresentou competente no processo de carga e descarga da bateria, permitindo desta forma aumentar o tempo de vida útil da bateria.

Em relação ao controlo de luminosidade dos LEDs de alto brilho que compõem o sinal de trânsito recaiu a preocupação por aplicar um sinal PWM, com um valor de *duty-cycle* reduzido, para que os LEDs acendam e apaguem rapidamente de maneira a que numa situação real não provoquem encandeamento aos condutores.

CAPÍTULO 6

Conclusões e Trabalho Futuro

6.1. Conclusões

Nesta dissertação foi apresentada uma solução de sinalização rodoviária com base na tecnologia LED tendo como fonte a energia solar fotovoltaica. O sistema é constituído por um circuito de controlo MPPT, de forma a extrair a máxima potência proveniente do painel fotovoltaico, por um controlador de carga, que providencia a carga e descarga apropriada de uma bateria de ácido chumbo e por um circuito de controlo para o módulo de iluminação, controlando a intensidade do brilho da matriz de LEDs.

Inicialmente, no Capítulo 2, efectuou-se um estudo das diferentes topologias de ligação de painéis fotovoltaicos a receptores luminosos, podendo estas operar ligadas ou independentes da rede eléctrica. Realizou-se com maior ênfase uma análise a sistemas fotovoltaicos autónomos, que funcionam independentemente da rede eléctrica, por se tratar do tipo de sistema implementado nesta dissertação. Apresentou-se o princípio de funcionamento das células fotovoltaicas através do circuito eléctrico equivalente, no modelo simplificado e aperfeiçoado. Com base no circuito eléctrico equivalente que é constituído por uma fonte de corrente (I_{SC}), um díodo (D) e uma resistência série (Rs), implementou-se, no MATLAB, o modelo matemático das células fotovoltaicas para o estudo das suas características, para desta forma simular o painel solar fotovoltaico BP SX30U. Os factores climatéricos que influenciam directamente as características eléctricas de um painel fotovoltaico são a intensidade da radiação solar incidente e a temperatura das células. O modelo matematicamente simulado permite observar o comportamento da corrente, tensão e da potência sob condições de temperatura e radiação solar diferentes das condições padrões de teste (radiação solar incidente de 1000W/m^2 e temperatura da célula de 25ºC). Além destes factores referidos, existem outros

agentes, que foram considerados e, que influenciam as curvas características I-V e P-V, como é o caso da resistência série (Rs) e o factor de idealidade do díodo (D), para assim se conseguirem resultados mais aproximados das curvas apresentadas no *datasheet* do painel solar fotovoltaico BP SX30U.

Devido às características de funcionamento dos painéis fotovoltaicos, estudadas no Capítulo 2, verificou-se que o ponto onde a potência máxima é gerada não é constante, variando com a temperatura e radiação solar incidente no painel. Assim, no Capítulo 3, foi apresentada uma análise detalhada das técnicas de controlo a aplicar a sistemas fotovoltaicos de forma a extrair a máxima potência proveniente dos painéis fotovoltaicos. As técnicas analisadas foram a Tensão Constante (CV), Corrente de Curto-Circuito (SC), Condutância Incremental (IncCond) e Perturbação & Observação. Efectuou-se um estudo comparativo dos vários métodos e optou-se por implementar um circuito MPPT baseado na técnica Perturbação & Observação. Esta escolha deveu-se essencialmente à maior facilidade de implementação, quando comparado com a técnica IncCond, e por este método permitir de forma satisfatória responder às exigências desta dissertação de mestrado.

Os sistemas fotovoltaicos isolados caracterizam-se por possuir apenas como fonte primária a energia gerada pelos painéis fotovoltaicos. Desta forma, neste modelo de sistemas torna-se essencial utilizar elementos armazenadores de energia. Por isso, ainda no Capítulo 3, apresentou-se um estudo das características e tecnologias primordiais associadas às baterias recarregáveis, com a finalidade de serem integradas no sistema fotovoltaico proposto neste trabalho. As baterias de ácido chumbo são as mais utilizadas em sistemas fotovoltaicos, e dessa forma foram as escolhidas para efectuar o armazenamento de energia gerada pelo painel em períodos de elevada insolação para a utilizar à noite ou em períodos com pouca radiação solar. De forma a providenciar a carga e descarga apropriada da bateria é essencial adicionar ao sistema um controlador de carga para garantir que a bateria funcione em condições apropriadas. O circuito de controlo utilizado para garantir o bom funcionamento da bateria é baseado no método dos 3 estágios, ou seja, a técnica dos 3 ciclos de carga (corrente constante, tensão constante e tensão flutuante).

No Capítulo 3 elaborou-se também um estudo comparativo das topologias de conversores CC-CC que melhor se enquadram nesta dissertação. Para isso foram consideradas as especificidades do painel fotovoltaico BP SX30U em

conjunto com a faixa de operação da tensão de uma bateria de 12V, e optou-se pela implementação de um conversor CC-CC *step-down*. Assim, elaborou-se uma apresentação teórica desta topologia de conversores CC-CC e de como controlar o valor do *duty-cycle* a aplicar ao semicondutor do conversor de maneira a obter na saída um valor pretendido. O método de controlo PWM foi o utilizado para tal fim. Foram ainda dimensionados os componentes que constituem o conversor *step-down* para posterior simulação computacional e implementação prática. Este dimensionamento foi efectuado com base na condição mais crítica sofrida pelo conjunto painel solar – bateria, que acontece quando existe máxima radiação solar sobre o painel e a bateria está completamente descarregada.

Com base em tudo que foi exposto nos capítulos anteriores, no Capítulo 4 foi elaborada a simulação computacional do sistema fotovoltaico, utilizando o Simulink do MATLAB que apresenta uma interface gráfica simples e intuitiva, representando o sistema por diagrama de blocos. O modelo matemático do painel solar fotovoltaico BP SX30U, com a solução numérica da corrente gerada pelo painel (Equação (2.21)), apresentado no Capítulo 2 foi a base de toda a simulação, pois caracteriza a fonte de energia de todo o sistema. O conversor CC-CC *step-down*, que efectua a ligação entre o painel solar e a bateria, foi simulado com os valores calculados no dimensionamento efectuado no Capítulo 3, apresentando resultados satisfatórios. Foram efectuadas simulações com o sistema a funcionar em malha aberta, com um sinal PWM fixo, e com o circuito MPPT em funcionamento, de forma a rastrear o ponto de máxima potência da curva característica P-V do painel solar. Como referido anteriormente, para o circuito MPPT foi utilizada a técnica de Perturbação & Observação. Com a intenção de simular a bateria de ácido chumbo de 12V foi utilizado o modelo genérico para baterias recarregáveis disponível no pacote Power Systems do Simulink.

Finalmente, no Capítulo 5 foi feita a descrição de todo o trabalho experimental efectuado e foram mostrados os resultados obtidos para os diversos ensaios efectuados. A implementação prática do sistema baseou-se em duas unidades diferentes, sendo que a unidade de comando é responsável por efectuar todo o controlo a enviar para o MOSFET do *step-down*. O circuito de potência, composto pelo conversor CC-CC *step-down* é a outra parte constituinte do sistema, que dependente do sistema de controlo implementado efectua o circuito MPPT, o controlador de carga da bateria e o controlo de

luminosidade dos LEDs do módulo de iluminação. Inicialmente foi realizado um ensaio ao conversor *step-down* com controlo em malha aberta, ou seja, com sinal PWM fixo de maneira a verificar o seu funcionamento como conversor abaixador de tensão. Depois, para cada circuito de controlo em malha fechada (circuito MPPT, controlador de carga da bateria e controlo de luminosidade dos LEDs), foram efectuados ensaios independentes obtendo-se os resultados esperados. Devido à utilização de uma fonte de tensão constante a emular o painel fotovoltaico, para se verificar o funcionamento do circuito MPPT foi necessário incluir no circuito uma resistência, da mesma ordem de grandeza da carga do *step-down*, em série com a fonte para desta forma se obter uma curva característica I-V parecida com as curvas características do painel fotovoltaico. Assim, o circuito MPPT efectuou a busca constante do ponto de máxima potência dessa curva, oscilando o sistema em torno deste devido à utilização da técnica Perturbação & Observação que proporciona precisamente esse facto. Em relação ao controlador de carga e descarga da bateria foi realizado um controlo rigoroso, com base no método dos 3 ciclos de carga (corrente constante, tensão constante e carregamento flutuante). Durante cada ciclo deste processo existem grandezas que devem ser controladas para que a bateria opere em condições apropriadas. Desta forma, para realizar o controlo destas grandezas foi implementado um controlador PID digital que apresentou uma boa dinâmica, proporcionando desta forma o correcto funcionamento de carga e descarga da bateria.

Numa observação geral do trabalho efectuado pode concluir-se que os objectivos propostos inicialmente para este dissertação de mestrado foram atingidos. Foi feito o levantamento do estado da arte da utilização de painéis fotovoltaicos como fontes de alimentação em sistemas independentes de iluminação, com o estudo de diferentes topologias de ligações de painéis a receptores luminosos de corrente continua. Elaborou-se um estudo pormenorizado de circuitos MPPT com vista a posteriores simulações computacionais, onde se investigaram variadas ferramentas, e ao desenvolvimento prático destes circuitos, com ambas as tarefas a apresentarem bons resultados. Desenvolveu-se um conversor electrónico de potência da topologia *step-down* capaz de utilizar a saída do painel fotovoltaico para carregar uma bateria de ácido chumbo de 12V e 7,2Ah de capacidade. Depois desenvolveu-se um circuito de interface entre a bateria e uma matriz de LEDs de alto brilho, que emularam um sinal de trânsito rodoviário. Em termos

experimentais, todos os sistemas desenvolvidos apresentaram um funcionamento dentro daquilo que era esperado, proporcionando por isso resultados satisfatórios.

6.2. Sugestões de Trabalho Futuro

Para o desenvolvimento futuro e numa perspectiva enriquecedora do trabalho efectuado sugerem-se como propostas de trabalho futuro algumas ideias. Seria interessante efectuar uma análise ainda mais detalhada das topologias de sistemas fotovoltaicos para se incorporar ao projecto desta dissertação um inversor CC-CA e desta forma englobar no sistema um barramento de CA para efectuar a ligação a cargas de CA.

No que diz respeito a simulações computacionais seria interessante utilizar outras ferramentas de simulação, como são o caso do PSim e do PSCAD, e comparar os resultados com os apresentados nesta dissertação para posteriormente se verificar perante as montagens práticas qual das ferramentas se aproxima mais da realidade. Ainda em termos de simulações computacionais sugere-se a simulação de todas as técnicas de controlo MPPT descritas nesta dissertação, formando-se desta forma uma opinião mais consistente dos vários métodos com o intuito de escolher o mais apropriado para uma posterior implementação prática.

Na implementação prática sugere-se a utilização de um painel solar fotovoltaico, pois nesta dissertação foi usada uma fonte de tensão contínua de forma a emular o painel, devido à indisponibilidade de painéis solares. Outra perspectiva futura passa por efectuar todos os circuitos constituintes do sistema em placas de circuito impresso e equipar um sinal de trânsito com matrizes de LEDs de alto brilho, em vez de uma matriz a simular o sinal, como efectuado nesta dissertação.

Referências Bibliográficas

[1] M.D. Emprego, "DGEG - Direcção Geral de Energia e Geologia," *http://www.dgge.pt/ visitado em Junho 2011*.

[2] A. Vallera, "Energia Solar Fotovoltaica," *Gazeta de Física*, pp. 36-40.

[3] ADENE, "A Energia Solar," *http://www.renewable.pt/pt/RE/Paginas/Sol.aspx visitado em Junho 2011*.

[4] J.E. Commission, "Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS) - Geographical Assessment of Solar Resource and Performance of Photovoltaic Technology," *http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/ visitado em Julho 2011*.

[5] D.G. Geologia, "Renováveis - estatísticas rápidas. Dezembro," 2010, pp. 1-22.

[6] R.N. Hora, "Ponha a sua casa a trabalhar," *http://www.renovaveisnahora.pt/web/srm visitado em Maio 2010*.

[7] P.A. Online, "Palácio de Belém instala 126 painéis fotovoltaicos," *http://www.ambienteonline.pt/noticias/detalhes.php?id=7081 visitado em Junho 2011*.

[8] M.D. Inovação, *Energias Renováveis em Portugal*, 2007.

[9] C.M. Rodrigues, C.D. Roque, and J.M. Macedo, *Manual do Planemaneto de Acessibilidades e Transportes - Sinalização rodoviária*, Comissão de coordenação e desenvolvimento regional do Norte, 2008.

[10] I.D. Vieira, *"Projeto de um conversor Flyback auto-oscilante de baixo custo para LED's de potência"*, Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Minas Gerais (Escola de Engenharia), 2009.

[11] A.L. Lima, A.G. Jedyn, F.A. Corrêa, and E.L. Mehl, *USO DE LEDS EM SEMÁFOROS DE TRÂNSITO: UM ESTUDO DA VIABILIDADE TÉCNICO-ECONÔMICA*, Curitiba – Paraná - Brasil: 2009.

[12] T.C. Diego, "Street Division Electrical - Traffic Signals," *http://www.sandiego.gov/street-div/trflight.shtml visitado em Maio 2011*.

[13] "Energia - Agência Cascais Energia Revista de Imprensa - Janeiro 2011," *metro*, 2011.

[14] Expresso, "Energia: Semáforos de Cascais e Baixa Pombalina com tecnologia LED," *http://aeiou.expresso.pt/energia-semaforos-de-cascais-e-baixa-pombalina-com-tecnologia-led-actualizada=f507128 visitado em Junho 2011*.

[15] L. Castafier and S. Silvestre, *Modelling Photovoltaic Systems using PSpice*, Barcelona: Universidad Politecnica de Cataluña, 2002.

[16] DGS, *Energia Fotovoltaica - manual sobre tecnologias, projecto e instalação*, 2004.

[17] SOLVOLT, "...não brilha sobre nós, mas dentro de nós. Efeito fotovoltaico da junção P-N," *http://www.solvolt.com/main.asp?cont=formQualidade visitado em Abril 2010*.

[18] R.M. Castro, *Energias Renováveis e Produção Descentralizada INTRODUÇÃO À ENERGIA FOTOVOLTAICA*, DEEC/Área Cientifica de Energia - Universidade Técnica de Lisboa: 2008.

[19] R.M. Sá, *"Circuito de Interface para Ligação de Painel Fotovoltaico a Cargas"*, Dissertação de Mestrado - Universidade do Minho (Departamento de Electrónica Industrial), 2008.

[20] A. Oi, *"DESIGN AND SIMULATION OF PHOTOVOLTAIC WATER PUMPING SYSTEM"*, San Luis Obispo: Thesis - California Polytechnic State University, 2005.

[21] W.D. Soto, *"Improvement and Validation of a Model for Photovoltaic Array Performance"*, Madison: Thesis - University of Wisconsin (Solar Energy Laboratory), 2004.

[22] K. Chao, S. Ho, and M. Wang, "Modeling and fault diagnosis of a photovoltaic system," *Electric Power Systems Research*, vol. 78, 2008, pp. 97-105.

[23] R.J. Ferreira, *"Carro a Energia Solar"*, Dissertação de Mestrado - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2008.

[24] M.A. Green, *Solar Cells : Operating Principles, Technology and System Applications*, University of New South Wales, 1986.

[25] F. Zhang, J. Bijleveld, E. Perzon, K. Tvingstedt, S. Barrau, and O. Ingana, "High photovoltage achieved in low band gap polymer solar cells by adjusting energy levels of a polymer with the LUMOs of fullerene derivatives," *Journal of Materials Chemistry*, 2008, pp. 5468-5474.

[26] BP Solar, *30 Watt Photovoltaic Module BPSX30, Datasheet*, 2004.

[27] G.R. Walker, *Evaluating MPPT Converter Topologies Using a MATLAB*

PV Model, Dept of Computer Science and Electrical Engineering, University of Queensland, Australia: 2000.

[28] Y. Wang and C. Klumpner, "Optimal Design of a DC / DC Converter for Photovoltaic Applications," *Components*, 2005, pp. 2529-2534.

[29] H. Calleja, F. Chan, and I. Uribe, "Reliability-Oriented Assessment of a DC / DC Converter for Photovoltaic Applications," *Control*, 2007, pp. 1522-1527.

[30] B. César and J. Kaffer, "Wireless Networking in the Developing World. A practical guide to planning and building low-cost telecommunications infrastructure," *Traffic*.

[31] T. Esram and P.L. Chapman, "Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques," *Energy*, vol. 22, 2007, pp. 439-449.

[32] R. Faranda, S. Leva, and V. Maugeri, "MPPT techniques for PV Systems: energetic and cost comparison," *Production*, 2008, pp. 1-6.

[33] B. S, N. A, R. G, K.A. S, and L.C. J, "The Study and Evaluation of Maximum Power Point Tracking Systems," *Environment*, vol. 2006, 2006, pp. 17-22.

[34] P.J. Bonifácio, *"Seguidor Fotovoltaico: uma variação do P&O - Simulação e prototipagem"*, Dissertação de Mestrado - Universidade Nova de Lisboa, 2010.

[35] C. Liu, B. Wu, and R. Cheung, "ADVANCED ALGORITHM FOR MPPT CONTROL OF PHOTOVOLTAIC SYSTEMS," *Buildings*, C.M. Department Of Electrical & Computer Engineering, Ryerson University, Toronto, Ontario, Montreal, August 20-24: 2004.

[36] J. Imhoff, *"DESENVOLVIMENTO DE CONVERSORES ESTÁTICOS PARA SISTEMAS FOTOVOLTAICOS AUTÔNOMOS"*, Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Santa Catarina, 2007.

[37] J.I. Seguel, *"Projeto de um sistema fotovoltaico autônomo de suprimento de energia usando técnica MPPT e controle digital"*, Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Minas Gerais (Escola de Engenharia), 2009.

[38] B. Mammano, "Portable Power - A Designer's Guide to Battery Management," *Energy*, 2001.

[39] L.H. Vera and A. Krenzinger, "Comportamento de baterias automotivas seladas sob diferentes condições de operação," *Avances en Energias Renovables y Medio Ambiente*, vol. 11, 2007, pp. 33-40.

[40] R.H. Rosemback, *"Conversor CC-CC Bidirecional Buck-Boost Atuando como Controlador de Carga de Baterias em um Sistema Fotovoltaico"*, Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Juiz de Fora

(Faculdade de Engenharia), 2004.

[41] A. Jossen, J. Garche, and D.U. Sauer, "Operation conditions of batteries in PV applications," *Solar Energy*, vol. 76, 2004, pp. 759-769.

[42] J.Controls, "VARTA START-STOP PLUS COM TECNOLOGIA AGM," *http://www.varta-automotive.com/index.php? id=351&L=16 visitado em Maio 2010*.

[43] N.W. Sun, "Deep Cycle Battery FAQ The Ultimate Fact & FAQ File for Deep Cycle Batteries," *http://www.windsun.com/Batteries/Battery_FAQ.htm visitado em Maio 2010*.

[44] R.L. Andersen, *"Sistema de interligação entre módulos geradores de energia a partir de células a combustível do tipo pem e um banco de baterias"*, Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Santa Catarina, 2006.

[45] G.G. GTES and CEPEL-CRESESB, *Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos*, PRC-PRODEEM, 2004.

[46] D.T. Unicoba, *Bateria Chumbo-Ácida Selada Regulada por Válvula*, Manual Técnico UNIPOWER, 2003.

[47] E.L. Garrido, *"Concepção e certificação de nova geração de candeeiros de iluminação pública"*, Dissertação de Mestrado - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2010.

[48] J. Dunlop, W. Bower, and S. Hanington, "PERFORMANCE OF BATTERY CHARGE CONTROLLERS : FIRST YEAR TEST REPORT," *System*, 1991, pp. 640-645.

[49] T. Hund, "Capacity Loss in PV Batteries and Recovery Procedures," *Contract*, pp. 1-12.

[50] N.A. Reis, *"O automóvel híbrido como elemento fornecedor-consumidor de electricidade - Modelação de baterias"*, Dissertação de Mestrado - Universidade Técnica de Lisboa, 2008.

[51] M. Trindade, J.S. Martins, and J.L. Afonso, "Sistema para Optimização da Extracção de Energia de Painéis Solares Fotovoltaicos," *Conferência sobre Energias Renováveis e Ambiente em Portugal*, Figueira da Foz, Portugal, 5-7 de Maio: 2005, pp. pp. 1.165-1.170.

[52] H. Chan and D. Sutanto, "A New Battery Model for use with Battery Energy Storage Systems and Electric Vehicles Power Systems," *Order A Journal On The Theory Of Ordered Sets And Its Applications*, vol. 00, 2000.

[53] M. Urbain, S. Raël, B. Davat, and P. Desprez, *State Estimation of a Lithium-Ion Battery Through Kalman Filter*, 2007.

[54] Z.M. Salameh, M.A. Casacca, and W.A. Lynch, "A Mathematical Model for Lead-Acid Batteries," *IEEE Trans. on Energy Conversion. Vol. 7, No. 1, March*, 1992.

[55] N. Mohan, T. Underland, and W. Robbins, *Power Electronics Converters, Applications and Design*, John Wiley & Sons, Inc, 1995.

[56] D.W. Hart, *Introduction to Power Electronics*, Prentice-Hall, 1997.

[57] H.L. NASCIMENTO, *"CONVERSOR BUCK COMO INTERFACE ENTRE PAINÉIS"*, Dissertação de Mestrado - Universidade Federal do Espírito Santo, 2006.

[58] D.B. Riffel, *"Unidade de Osmose Reversa Acionada por Energia Solar Fotovoltaica sem Baterias: Simulação, Projeto e Validação Experimental"*, Dissertação de Mestrado - Universidade Federal do Ceará, 2005.

[59] MathWorks, "MathWorks - Accelerating the pace of engeneering and science," *http://www.mathworks.com/help/toolbox/physmod/powersys/ref/battery.html visitada em Setembro 2010*.

[60] M.T. Inc., *Datasheet PIC18F2331/2431/4331/4431*, 2003.

[61] LEM, *Datasheet Voltage Transducer LV 25-P*, 2008.

[62] LEM, *Datasheet Current Transducer LA 55-P*, 2008.

[63] *3ª Aula de Controlo Inteligente - Controlo PID Discreto*, Instituto Politécnico De Tomar - Engenharia Electrotécnica, 2007.

[64] B.R. Copeland, "The Design of PID Controllers using Ziegler Nichols Tuning," *Response*, 2008, pp. 1-4.